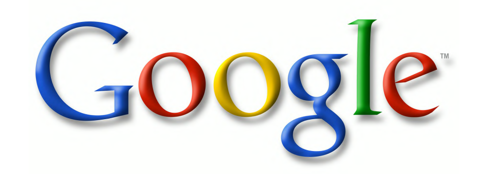




[illegible]

RECHERCHES

SUR

L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE

DE LA

CHALEUR.

RECHERCHES

SUR

L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR,

PRÉSENTÉES A LA

SOCIÉTÉ DE PHYSIQUE DE BERLIN,

PAR

GUSTAVE-ADOLPHE HIRN,

INGÉNIEUR CIVIL.

COLMAR,

BUREAU DE LA *REVUE D'ALSACE*, RUE DES MARCHANDS, 8.

1858.

COLMAR. — IMPRIMERIE DE CH.-M. HOFFMANN, IMPRIMEUR DE LA PRÉFECTURE.



PRÉFACE.

Le travail que je livre à la publicité a été présenté à un concours ouvert par la Société de physique de Berlin, pour la détermination expérimentale de la véritable valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur.

La lettre que j'ai eu le vif plaisir de recevoir de M. Du Bois-Reymond, indique le résultat final de ce concours.

Berlin, 13 juillet 1857.

MONSIEUR,

La Société de physique, dans sa séance de vendredi, le 10 juillet, a entendu le rapport de la commission chargée de l'examen des pièces présentées au concours, pour le prix relatif à la détermination expérimentale de l'équivalent mécanique de la chaleur. Voici, en résumé, le contenu de ce rapport.

Une seule pièce a été présentée au concours; cette pièce, Monsieur, c'est la vôtre.

Par un concours malheureux de circonstances, la commission s'est bientôt trouvée instruite de votre nom, ce qui n'était pas conforme aux règles du programme.

En effet, vous n'avez pas, comme cela est l'usage, joint à votre mémoire un billet cacheté, portant la même devise que le mémoire, et renfermant le nom de l'auteur; billet qui ne devait être ouvert que dans le cas où votre mémoire serait couronné. Au lieu de cela, vous avez joint à votre mémoire un billet adressé à l'Académie royale de Berlin, dans lequel le titre et la devise du mémoire se trouvent répétés, et dans lequel, en outre, vous avez mis votre nom et votre adresse. Après avoir appris, par ma correspondance avec M. Schmidt, que c'était à moi, et non au secrétaire de l'Académie des sciences qu'il aurait fallu adresser votre mémoire, vous m'avez prié, Monsieur, ainsi que vous vous en souvenez sans doute, d'ouvrir le billet adressé à l'Académie. C'est ainsi que, contrairement au programme, votre nom a été divulgué à la commission.

D'ailleurs, la commission s'est bientôt aperçue qu'une partie des expériences décrites dans votre mémoire n'étaient pas inédites, comme l'exigeait le programme. Les deux premières séries d'expériences se trouvent imprimées dans le bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse, n°s 128 et 129, janvier 1855, et un précis de la troisième série dans le *Cosmos* de M. l'abbé Moigno, tom. VI, p. 677. Ces trois séries étaient donc par là en quelque sorte exclues du concours; et, en outre, la commission avait eu de cette manière une nouvelle occasion d'apprendre votre nom.

Toutes ces infractions aux règles posées par le programme n'auraient pourtant pas empêché la commission de couronner votre mémoire, si des considérations d'un ordre plus graves n'étaient venues l'arrêter.

Vous avez fait, Monsieur, vis-à-vis du programme de la Société de physique, à peu près ce que Jean-Jacques fit vis-à-vis de celui de l'Académie de Dijon. La Société demande

la détermination exacte de l'équivalent mécanique de la chaleur. Vous vous êtes efforcé de prouver qu'un tel équivalent n'existe pas.

Cependant un examen approfondi des trois premières séries de vos expériences a amené la commission à penser que, loin de démontrer ce nouveau principe, ces expériences, en en discutant les résultats d'une certaine manière, tendraient bien plutôt à prouver l'existence de l'équivalent en question et même fourniraient des chiffres assez concordants avec ceux déduits par d'autres expérimentateurs.

Il m'est impossible, dans les limites de cette lettre, d'entrer dans le détail de cette critique. Le rapport de la commission sera imprimé, et j'aurai l'honneur de vous en transmettre un certain nombre d'exemplaires.

Bien que, d'après ce que je viens de vous dire, la commission se soit vue dans l'impossibilité de couronner votre mémoire, elle a jugé que vous aviez, dans vos travaux, fait preuve de tant de zèle, de sagacité, de persévérance et d'adresse, qu'il serait désirable que la Société vous donnât une marque de son estime et qu'elle fît son possible pour vous indemniser quelque peu des frais considérables qu'ont dû vous causer vos recherches. Elle a par conséquent proposé à la Société de vous offrir la somme de 250 thalers en or (soit 50 Frédérics d'or), destinée à l'auteur du mémoire couronné à titre de récompense et d'indemnité.

La société a adopté les conclusions du rapport de sa commission et m'a chargé de vous en donner connaissance. Je viens donc aujourd'hui, Monsieur, vous demander vos ordres pour vous transmettre la somme en question. Conformément au programme, la Société désire garder le manuscrit de votre mémoire. Cependant je vous renverrai le se-

lettre de son président, et pour l'indulgence qu'elle a eue à l'égard de ce travail.

En effet, par ignorance du programme officiel, je me suis placé sous plusieurs rapports en dehors des conditions du concours, beaucoup plus que ne le dit même M. Du Bois-Reymond. Et je ne puis savoir assez de gré à la commission d'examen d'avoir passé sur cette considération en me décernant le prix du concours.

Il est cependant un genre d'infraction aux règles du programme dont je crois de mon devoir de me justifier, par déférence pour la Société de physique de Berlin. Je veux parler de la publicité qu'auraient reçue plusieurs parties de mon travail avant le concours.

1° Le bulletin n°s 128 et 129 de la Société Industrielle de Mulhouse renferme un long travail sur la meilleure manière d'essayer les huiles servant au graissage des machines, travail qui m'a été demandé par le comité de mécanique de cette société, et qui accessoirement renferme déjà une suite d'expériences sur la chaleur donnée par le frottement, ainsi que des considérations assez développées sur l'équivalent mécanique de la chaleur.

A ce dernier point de vue, ces expériences ont été *continuées* longtemps après la publication du mémoire en question ; et comme elles m'ont donné rigoureusement les mêmes résultats que les précédentes, j'ai cru pouvoir les faire entrer sans grandes modifications de forme dans le mémoire que je destinais au concours.

La commission chargée d'examiner les pièces du concours a pu croire légitimement que je ne lui remettais qu'une copie, tandis qu'en réalité il s'agissait de nouvelles recherches, toutes destinées au concours.

RECHERCHES

SUR

L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE

DE LA

CHALEUR.

plateau pour rétablir l'équilibre primitif. Et il est évident aussi que tout l'excédant de poids, qu'il a fallu laisser sur le plateau, était nécessaire pour corriger un défaut de tare du levier et de ses agrès. Je suppose, par exemple, que, le tambour tournant dans son sens habituel, il ait fallu 10 grammes pour tenir le levier de niveau; et que le mouvement étant renversé, il ait fallu encore 5 grammes sur le même plateau, pour amener l'équilibre. La valeur du frottement équivaudra à 2, gr. 5 d'une part; et d'autre part, il est clair que 10 gr. — 5 gr. + 2 gr. soit 7, gr. 5, sont la valeur de la tare désormais nécessaire pour maintenir horizontal le levier, suspendu de manière à pivoter sans résistance aucune autour de l'axe du tambour. On se dira sans doute qu'en graissant le tambour d'une manière quelconque, et en le faisant tourner alternativement dans un sens et dans l'autre, on aurait atteint le même but. Il suffira cependant pour faire comprendre qu'il n'en saurait être ainsi, de dire que la meilleure huile donnait un frottement tel, qu'il fallait au moins 500 gr. pour y faire équilibre; et que de plus, par plusieurs raisons aussi, les irrégularités dans le poids nécessaire à l'équilibre dépassaient de beaucoup la faible valeur de la tare qu'il fallait pour lester parfaitement le plateau de pesée.

Quant à l'explication du phénomène, en apparence bizarre, dont je viens de parler, je ne sortirai pas de mon sujet en la développant ici. J'avais, dans le principe, construit la balance de frottement pour juger de la qualité des huiles et des graisses employées, dans l'industrie, au graissage des machines. Dès mes premières recherches, je remarquai que la valeur absolue du frottement est presque en raison directe de la viscosité de l'huile, ou de tout autre matière employée comme intermédiaire; et que, toutes choses égales d'ailleurs, une même huile produit d'autant moins de frottement qu'elle est rendue plus fluide par la chaleur; que parmi les diverses huiles la meilleure est toujours la plus fluide, pourvu qu'elle ne soit ni volatile, ni sujette à s'altérer; que l'eau, l'alcool, etc. etc., qui sont encore plus fluides que l'huile, diminuent aussi plus qu'elle la valeur du frottement. — Il résulte de là qu'un corps gazeux, que l'air qui est encore infiniment plus fluide que l'eau, diminuerait encore beaucoup plus le frottement de deux surfaces en regard et en mouvement

relatif, que ne le fait l'huile, s'il était possible d'introduire et de maintenir ce corps gazeux d'une manière continue entre les parties ainsi en mouvement. Or, ce conditionnel n'est nullement une impossibilité. Pour maintenir sous notre coussinet un corps aussi dénué de viscosité que l'eau, il fallait que le tambour tournât avec une vitesse voulue : au-dessous d'une certaine limite, l'eau était complétement exprimée par la pression ; le coussinet touchait le tambour, et le frottement devenait à l'instant énorme. On conçoit donc que si l'on augmente encore davantage la vitesse du tambour, il arrivera un moment où l'air, que le tambour tend à entraîner sous le coussinet, ne sera plus exprimé par la pression ; et que, dès ce moment, c'est l'air qui deviendra la matière lubrifiante sur laquelle le coussinet flottera, et qui tendra à l'entraîner dans son mouvement. Je dois ajouter ici qu'en raison du poli parfait des surfaces, et en raison de leur grande étendue relative, il ne fallait pas même une vitesse excessive pour obtenir l'effet cherché ; et que 100 à 120 tours par minute suffisaient parfaitement. — Quoi qu'il en soit, on conçoit maintenant comment, à l'aide de ce phénomène, j'ai pu tarer mon levier de 50 kilog. à 1 gr. près.

Je vais maintenant indiquer avec détail les expériences qui ont eu pour objet la détermination du calorique développé par le frottement. Ces expériences ont été de trois genres tout différents et si opposés, qu'elles se servent réciproquement de contrôle, ainsi qu'on va bientôt le comprendre. 1er Genre (exp. 1 à 26 inclusivement, tabl. A). Un filet d'eau froide coulant à travers le tambour maintenait la température de l'appareil à un degré voulu et parfaitement constant. Le calorique développé était évalué d'après l'échauffement du poids connu d'eau qui avait traversé le tambour. La perte de calorique par les parois était introduite, comme correction, dans les calculs. 2e Genre (exp. 27 à 30, tableau A). L'appareil était abandonné à lui-même, jusqu'à ce qu'il parvînt à une température constante, ou en d'autres termes, jusqu'à ce qu'il perdît par ses parois autant de calorique qu'il en recevait par le frottement. C'est cette perte qu'il fallait ici évaluer. 3e Genre (exp. du tableau B). L'appareil était porté à une température bien supérieure à celle qu'il atteignait spontanément par suite du frottement. Puis, il était abandonné

à lui-même. C'est la durée du refroidissement pour chaque degré thermométrique, qui sert ici à la fois à calculer la quantité de calorique produite et la quantité perdue par les parois à chaque température. Je vais entrer dans les détails nécessaires pour bien faire saisir la marche et la valeur de ces trois genres d'expériences.

1[re] Série. Le tambour T étant graissé avec l'huile qu'on voulait essayer, et marchant depuis un certain temps, un filet d'eau froide était introduit par la petite ouverture. Lorsque le thermomètre du coussinet était parvenu au degré voulu, on l'y maintenait en réglant convenablement le courant d'eau : l'expérience ne commençait qu'à partir de ce moment. La vitesse du tambour étant maintenue aussi régulière que possible à l'aide des cônes, un compteur relevait le nombre de tours qu'il faisait. Le levier LL était constamment équilibré à l'aide des poids mis sur le plateau PP ; on prenait fréquemment la température de la chambre ; on notait la température de l'eau entrant au commencement, au milieu et à la fin de l'expérience, dans l'appareil; on la relevait du tambour, lorsqu'au sortir elle était devenue constante ; puis, l'expérience étant terminée, on pesait l'eau ainsi échauffée. Il est clair maintenant qu'avec les éléments précédents, il était possible de déterminer, d'une part, la force absorbée par le frottement, et d'autre part, la quantité absolue de calorique produite par ce frottement. 1° En effet, il est aisé de voir que le tambour, avec son coussinet, constituent un véritable frein de Prony, à cette seule différence près que la pression variable des mâchoires du frein est ici remplacée par la pression constante du coussinet sur le tambour, due au poids du coussinet et de ses agrès (ce poids est de 50 kilog.). Si donc nous nommons L la longueur O L du levier, N le nombre total de tours du tambour, P le poids mis sur le plateau, on aura $2\pi NPL = T$, pour la valeur du travail total dû au frottement. Ce genre de calcul est aujourd'hui si fréquemment employé, que je ne pense pas devoir m'y arrêter davantage. 2° Quant au calorique développé, il est aisé aussi de voir de quelle manière on peut l'exprimer en nombres. En effet, supposons que l'eau passant par le tambour prenne tout ce calorique, et choisissons, pour unité calorifique, la quantité de ce fluide impondérable nécessaire pour élever de 1° centig. la température de 1 kil. d'eau : si nous multiplions

le nombre de kilog. qui passent par l'appareil, par le nombre de degrés qu'ils y gagnent, nous aurons le nombre d'unités calorifiques ou de calories produit; autrement dit, W étant le poids de l'eau, t sa température finale, et i sa température initiale, on a $W(t-i)=Q^{\text{calories}}$. Notre supposition serait juste si l'appareil ne perdait rien par les parois, ce qui a lieu lorsque sa température est précisément égale à celle de l'air ambiant; mais la question se complique, lorsque, comme dans la plupart des cas, ces deux températures diffèrent. L'appareil perd alors une quantité de calorique souvent très-grande, et dont il faut tenir compte. Avant d'indiquer la nature de cette correction et la manière d'y parvenir, je dois discuter les chances d'erreurs que présente cette première partie des expériences. Ces erreurs portent principalement, ou même uniquement, sur la pesée à l'aide du plateau p, et sur la mesure de la température de l'eau sortant du tambour. Le nombre de tours du tambour, la durée de l'expérience, la température de l'air, du coussinet et de l'eau entrant, tous ces nombres ne pourraient être inexacts qu'en raison de la difficulté qu'éprouve nécessairement un seul observateur, pour relever tant de chiffres différents, sans se laisser pour cela, distraire de son expérience. Les deux premières évaluations, au contraire, présentaient, dans certains cas, de la difficulté intrinsèque. Lorsque la température du coussinet était tenue très-basse, et que, par suite, le frottement était très-considérable (voy. plus loin), le levier éprouvait des oscillations fort vives qui rendaient la pesée incertaine: j'estime à près de 5 p. °/₀ la possibilité de l'erreur. Cette source de faute devenait nulle vers 30°, et le poids se maintenait d'un bout à l'autre de l'expérience, lorsque l'huile était bonne. Quant à la température de l'eau au sortir du tambour, il n'était pas facile de la prendre avec toute la rigueur voulue, en raison du refroidissement dû à l'évaporation, aux parois du réceptacle r, etc., etc. Malgré toutes les précautions que j'ai prises, je crois quelques-uns de mes nombres un peu trop faibles. Mais ici encore, on a une limite certaine pour les erreurs.

La température de l'eau ne pouvait en aucun cas être inférieure à celle qu'indiquait le thermomètre du récipient r; elle ne pouvait non plus être supérieure à celle du coussinet. Or, ces deux

températures, comme on voit sur le tableau A, n'ont jamais différé de plus de 1°. Quant aux corrections nécessitées par suite de la différence des températures du coussinet et de l'air ambiant, elles étaient trop importantes pour que je n'y portasse pas toute mon attention; on verra bientôt quelle est la confiance qu'elles méritent, et quelle est l'étendue des erreurs possibles.

2e Série. Ainsi que je l'ai dit, l'appareil, graissé avec l'huile à essayer, était abandonné à lui-même jusqu'à ce qu'il fût parvenu à une température constante : il recevait alors autant de chaleur qu'il en perdait. Je pouvais donc d'une part calculer, comme ci-dessus, la force consommée par suite du frottement; et d'autre part, à l'aide de la loi de refroidissement que j'indiquerai bientôt, calculer le nombre de calories perdues dans l'unité de temps. Si simple que paraisse cette manière d'expérimenter, elle était cependant soumise à bien plus de chances d'erreurs que la précédente. Il fallait en effet toujours près de 5 heures de marche avant que le thermomètre du coussinet cessât de monter; or, lorsque la matière lubrifiante n'était pas très-bonne, le poids du plateau croissait nécessairement en raison d'un si long travail de friction. On conçoit de plus combien il est difficile de maintenir constante, à 1° près, la température d'un appartement, en quelque saison qu'on opère; chacun sait aussi combien il est difficile d'avoir toujours une même vitesse, dans un établissement où se trouvent des machines de tous genres. La température, les vitesses et le poids p, que je relevais à un moment donné, devaient donc rarement avoir été assez longtemps permanents, pour servir à un calcul rigoureux. Les quatre expériences 27.... 30 du tableau A sont celles où je suis le mieux parvenu à maintenir l'appareil dans les mêmes conditions d'un bout à l'autre; on voit combien elles s'accordent avec celles de la 1re série, et cet accord est certes une précieuse vérification des unes et des autres. Le rapport, existant entre le travail mécanique absorbé et le nombre de calories produit par le frottement, est en effet à très peu près le même dans ces deux séries.

3e Série. J'ai pu passer assez rapidement sur la manière de coordonner et de comparer les éléments de la 1re série d'expé-

riences, où la plus grande partie du calorique développé était évaluée par l'échauffement d'un poids connu d'eau. Ce genre d'expérience est facile à comprendre; et bien que fatigant et délicat, il n'exige de l'observateur que beaucoup de patience et d'attention. Il n'en est plus de même des expériences dont je vais parler, et qui sont réduites en nombres, sur le tableau B. La difficulté de l'observation se joint ici à celle de la traduction analytique des résultats de l'observation. Je prie donc le lecteur de me prêter pour quelque temps, toute son attention, et de mon côté je ferai mon possible pour être clair.

Le tableau A nous montre plusieurs expériences où la correction, nécessitée par suite des pertes de calorique par les parois, s'élève au quart, au tiers et même à la moitié du calorique estimé par l'eau qui traversait le tambour. Partout d'ailleurs cette correction entre pour une valeur notable dans le nombre total de calories évalué. Si la loi de refroidissement que j'ai admise était fausse, toutes ces corrections le seraient aussi; et le tableau A n'aurait plus aucune signification rigoureuse. Je dois donc montrer de quelle manière je suis parvenu à déterminer cette loi, et à m'assurer de son exactitude. Je ne pouvais *à priori* songer à appliquer à l'appareil les belles lois de refroidissement découvertes par Dulong et Petit (1818) : elles sont justes pour un corps en repos, placé dans une enceinte vide ou pleine de gaz non agité; or, mon appareil était loin de se trouver dans ces conditions. Formé des pièces les plus hétérogènes, entouré d'un air toujours très-agité, rempli partiellement d'eau dont l'évaporation contribuait aussi à le refroidir, il devait procéder, pensais-je, suivant une loi exceptionnelle. Ma première idée fut d'utiliser la singulière propriété qu'a l'air de pouvoir parfois agir comme matière lubrifiante (page 5); je me disais que, le frottement étant presque nul dans ce cas, la quantité de calorique dégagé serait insignifiante; et je me proposais de voir le temps qu'il faudrait à l'appareil pour se refroidir ou pour se réchauffer d'un certain nombre de degrés, lorsque sa température initiale serait supérieure ou inférieure à celle de l'air ambiant. L'irrégularité des résultats obtenus me fit bientôt renoncer à ce procédé, si simple en apparence (voir le tableau C) : cependant cette méthode eut au moins l'avantage

de me laisser entrevoir déjà la vraie loi de refroidissement, et de m'éviter ainsi de très-laborieuses recherches analytiques. Voici comment je me vis forcé d'opérer. Je graissai le tambour avec de l'huile de spermacéti, pour que le frottement fût aussi faible et aussi régulier que possible; puis, au bout d'un certain temps de marche, j'introduisis par la petite ouverture *b* un poids connu d'eau bouillante, qui resta dans le tambour pendant toute la durée de l'expérience. L'appareil était de la sorte porté à une température de beaucoup supérieure à celle qu'il eût acquise par le frottement; et par suite il s'abaissait graduellement à cette dernière. Pendant ce refroidissement, je comptais le temps que le thermomètre de l'appareil mettait à descendre de degré en degré; j'observais, pour chacun de ces degrés, la température de l'air; et, pour chaque demi-degré, je relevais le poids faisant équilibre au frottement. Voyons maintenant comment, à l'aide du tableau numérique ainsi obtenu, nous pourrons arriver à la loi du refroidissement.

Quelle était d'abord la quantité de calorique perdue, pour chaque degré d'abaissement du thermomètre? Désignons par W le poids d'eau en kilog. que représente l'appareil: s'il ne s'était pas produit de calorique par suite du frottement, chaque degré thermométrique eût représenté W. $1^0 = Q$ calories. Mais en réalité, il s'y ajoutait sans cesse de la chaleur; le tambour faisait *n* tours par minute: le bout du levier L' parcourait donc virtuellement 3^m, 52 *n* par minute. La charge sur le plateau était P kilog. : le travail par minute était donc *n* P 3^m, 52. Le temps nécessaire au thermomètre pour descendre était *t*: il se produisait donc, dans ce temps, R P *n t*, 3^m, 52 calories (R désignant le rapport, supposé constant, du travail au nombre de calories dû à ce travail). Pour chaque degré, l'appareil perdait donc en réalité ($W + 3,52\, n\, t\, P\, R$) calories. Cette valeur renferme deux inconnues, W et R. Voici comment j'ai déterminé W. Le tambour étant complétement vide, graissé au spermacéti et marchant avec une lenteur telle qu'on pût négliger le calorique développé par le frottement durant cette expérience, j'en constatai la température G, puis j'y versai un poids connu Π d'eau à une température *i* inférieure à G; au bout de peu d'instants, tout

l'ensemble atteignait une nouvelle température f donnée par le thermomètre. Soit maintenant P' le poids d'eau que représente l'appareil dont la température est descendue de G à F : le nombre de calories cédé à l'eau est donc P' (G — F). D'un autre côté, l'eau s'est élevée de i à f; elle a enlevé à l'appareil π $(f - i)$ calories ; on a donc l'égalité

$$P' (G - f) = \pi (f - i), \text{ d'où } P' = \pi \left(\frac{f-i}{G-f}\right).$$

D'après un grand nombre d'essais faits avec soin, j'ai trouvé P' = $2^k, 512$: il suffisait donc d'ajouter à ces $2^k, 512$ le poids d'eau bouillante introduite dans l'appareil, à chaque essai. Dans notre nombre de calories perdues (W + 3^m, 52 n P t R), nous n'avons plus à discuter que R. J'y reviendrai bientôt. Posons simplement

$$W + 3^m, 52\ n\ P\ t\ R = Q.$$

Regardons maintenant comme connue la loi exceptionnelle de refroidissement de notre appareil. Supposons que la quantité de calorique perdue par unité de temps ait été proportionnelle à la différence de température entre l'air et l'appareil, de telle sorte que, désignant par V la vitesse de refroidissement pour 1° de différence, on ait eu $v = V(C - G)$ pour la vitesse v répondant à une différence quelconque C — G, où C exprime la température de l'appareil, et G, celle de l'air ambiant. Si (C — G) et, par conséquent, v étaient constants, $n = V(C - G)\,t$ exprimerait le nombre de degrés perdus pendant un temps t : mais C varie, et diminue sans cesse ; la valeur de n ainsi obtenue est donc fausse, si t a une grandeur finie ; mais pour une diminution infiniment petite — D C, ayant lieu en un temps infiniment petit, $d\,t \times (C - G)$ reste constant, et l'on a rigoureusement : $- dC = V. (C - G)\,d\,t$ pour la valeur de D C. En intégrant, et en désignant par C et C' les températures qui repondent à $t = o$ et $t = t$, on a $V\,t = \log. \left(\frac{C-G}{C'-G}\right)$ (2), équation à l'aide de laquelle, connaissant une fois V, nous pourrons trouver le temps t que le thermomètre met à tomber de C à C'. Remarquons maintenant que V désigne la vitesse thermométrique pour 1° de différence : pour avoir la quantité de calorique perdue pour cette différence, il faut donc multiplier V par le nombre de Q calories que représente l'appareil pour un degré ;

or ce nombre est, comme nous avons vu ci-dessus, $(W+3^m,52\, n\, P\, t\, R)$; remarquons aussi que les logarithmes de l'équation (2) sont népériens, et qu'il faut les multiplier par 2,3026, pour avoir les logarithmes ordinaires. Nous arrivons ainsi à l'équation générale :

$$Q V t = 2{,}3026 (W + 3{,}52\, n P R\, t) \log. \left(\frac{C-G}{C'-G}\right) (3).$$

Dans cette équation si simple, t, W, n, P, C, C' et G sont des nombres fournis par l'expérience : Q V et R seuls y sont inconnus. Or, la table B, exp. 1re, nous montre qu'il a fallu $3^{min}, 21^{sec}$ au thermomètre, pour tomber de $56^0 = C$ à $55^0 = C'$; qu'il a fallu $16^{min}, 30^{sec}$ pour tomber de $46^0 = C$ à $45^0 = C'$. A l'aide de ces données, nous formerons, avec la formule (3), deux équations à deux inconnues, qui nous permettent très-aisément de déterminer Q V et R. On trouve ainsi $QV = o^{calories}, 0556$ et $R = 0{,}0027$. Ce sont ces deux nombres que j'ai introduits dans l'équation (3), avec les autres éléments de la table B, excepté t que j'ai ainsi déterminé théoriquement, en résolvant l'équation (3) par rapport à cette lettre. On voit de quelle remarquable façon ces temps t' calculés (col. X), s'approchent des intervalles t, donnés par l'expérience. Que prouve une telle concordance? Elle montre clairement : 1° que la loi de refroidissement $v = V (C-G)$, d'où dérive l'équation (3), est bien la loi qui convenait réellement[1] à l'appareil; et que par suite elle a pu servir aux corrections du tableau A ; 2° que la quantité de calorique, perdue par l'appareil en une minute et pour 1° de différence de température, était $0^{calories}, 0556$; et que, par conséquent, tous les nombres correctifs de la colonne XVI du tableau A, donnés par la formule $q = 0{,}0556\ (C-G)\ t$ sont justes ; 3° que le nombre R est constant, et très-approximativement égal à 0,0027. Or, ce nombre n'est autre chose que celui vers lequel convergent tous les chiffres de la colonne XX du tableau A, et qui exprime le rapport du travail mécanique à la quantité de calorique développé.

[1] On voit que cette loi n'est autre chose que celle qu'a assignée primitivement Newton au refroidissement des corps en général. Elle ne doit par conséquent en dépit du cas exceptionnel de mon appareil, être prise que comme une approximation, suffisamment rigoureuse toutefois, dans les limites de température où j'ai opéré.

Si le lecteur a bien saisi les différences capitales existant entre les trois séries d'expériences que je viens de décrire; s'il remarque celles qui existent entre les diverses expériences d'une même série quant aux conditions où elles ont été faites; et si de plus il fait attention que ces trois séries renferment des éléments communs, qui, bien qu'ils figurent comme variables dans les unes, et comme constants dans l'autre, conduisent pourtant à un même résultat final, il en conclura que ces expériences ont au plus haut point l'avantage de se contrôler réciproquement, et qu'elles excluent ainsi toute idée de coïncidence fortuite. Les nombres de la colonne XX, tableau A, varient à la vérité; mais ces variations ont lieu dans des limites resserrées, et ne suivent aucune loi apparente; elles sont tout aussi grandes pour deux expériences faites dans les mêmes conditions, que pour deux autres, faites dans des conditions entièrement différentes : elles dérivent donc d'erreurs expérimentales, qu'il est impossible d'annuller entièrement dans des expériences à la fois si délicates et si pénibles.

Le rapport R, qui se trouve consigné sur notre tableau et que j'ai laissé tel quel pour la facilité des calculs, n'est, comme on voit, autre chose que la fraction de calorie produite par l'unité de travail de 1 kilog. élevé à 1^m de hauteur. Il est clair que, si l'on divise maintenant par cette fraction notre unité elle-même, nous aurons l'expression de la quantité de travail, ou du nombre de kil. mét., nécessaire dans le frottement médiat pour produire une calorie. Autrement dit, nous aurons la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur développée par le frottement médiat. En raison des petites variations qu'affecte le nombre R, je n'ai pas fait la division pour chaque nombre, et je me borne à la faire ici pour la moyenne générale du tableau, qui est 0,002691, et qui nous donne $\Sigma = 371^{k.m.},6$.

Les plus grands écarts de notre nombre sont 0,00262 et 0,00278, ce qui donne 381,2 et 359,7 pour l'équivalent, dont, en ce qui concerne les frottements médiats, la valeur moyenne est 371,6. — S'il m'est permis de présenter une opinion personnelle, fondée sur des détails trop longs à mentionner et sur le sens général des défectuosités de mon expérimentation, je dirai que le nombre 371,6 pèche plutôt en plus qu'en moins; et que la

moyenne réelle de mes résultats est plutôt au-dessous qu'au-dessus. — Je discuterai, dans le résumé général, les résultats des expériences précédentes, et ceux de quelques expériences isolées que j'ai faites sur les frottements immédiats. Je ne mentionne pas encore ces dernières, parce que je n'étais pas aussi satisfait de leur exactitude ; tandis que les premières, répétées sous toutes les formes imaginables, me paraissent dignes de confiance, du moins dans les limites inévitablement imposées à un genre de recherches si délicates, que peuvent troubler tant de causes échappant à l'œil de l'observateur le plus exercé.

CHAPITRE II.

RELATION QUI EXISTE ENTRE LE TRAVAIL DÉPENSÉ ET LE CALORIQUE PRODUIT PAR LA DÉSAGRÉGATION DES CORPS.

Les expériences que j'ai faites à ce sujet ne sont que d'un genre, et sont trop peu nombreuses pour qu'il puisse être permis d'en tirer des déductions tout-à-fait générales. — Cependant, comme j'ai cherché à les rendre aussi correctes qu'il est possible, je pense qu'elles auront encore une certaine valeur relative.

A l'aide d'un appareil que je vais décrire, j'ai étudié les résultats dynamiques et calorifiques que donne l'action d'un foret lorsque, par son mouvement de rotation, il perce une masse métallique.

FFFF, cylindre vertical d'un tour à forer ordinaire, tournant très régulièrement sur son axe, pouvant s'élever ou s'abaisser à volonté par un mouvement de vis, portant le foret $fff''f''f''$ dont la mèche $f''f''$, en acier trempé, avait 0^m, 06 de largeur.

$OOO'O'm$, masse cylindrique, en fer doux, ou tout autre métal à essayer, pouvant tourner sur la pointe m, percée verticalement jusqu'en r, d'un creux cylindrique où se loge l'extrémité f' du foret, et obligée de se tenir ainsi verticalement pendant que la mèche $f''f''$ s'abaisse et perce un trou cylindrique de 0^m, 06 de diamètre.

$aa'a'a$, caisse cylindrique, en ferblanc, soudée en $o'o'$ à la masse de fer, de manière à pouvoir contenir de l'eau.

ll', levier calé sur la partie carrée inférieure de la masse de fer à l'extrémité l' duquel est attachée une ficelle qui va passer sur une

poulie *pp* et qui porte à son autre bout le poids B. (Le levier et la ficelle, jusqu'à la poulie à gorge, sont dans le même plan horizontal et font ensemble un angle droit, lorsqu'il y a équilibre entre le poids B et l'effort qui tend à le lever.)

CC, capsule où repose la pointe *m*.

SSSS, support du tour, etc., etc.

Le foret tournant dans le sens de la flèche *nn*, tendait à entraîner la masse de fer et par conséquent le levier *l' l'*; celui-ci étant retenu par le poids B exactement nécessaire à l'équilibre, on avait pour l'expression de la quantité de travail absorbée par le forage : $T=2\pi LNB$, N désignant le nombre de tours total et L la longueur du levier.—En désignant par P le poids d'eau contenu dans la caisse *aaaa*, par P' le poids d'eau représenté par l'ensemble *aa oo' m oo' a'a*, par *t* la température finale de l'eau, par *i* sa température initiale, on a pour le nombre de calories produites $q=(P+P')(t-i)$, et par conséquent $T:q$ pour la valeur de l'équivalent mécanique d'une calorie.

La température de l'atelier étant par exemple 20°, et la température initiale de l'eau et de l'appareil 15°, on continuait le forage jusqu'à ce qu'on eut atteint 25°; il y a donc compensation entre le bénéfice et la perte de calorique par les parois. Le poids P' a été déterminé de la manière suivante : on versait dans le vase de ferblanc un poids connu d'eau froide suffisant pour que l'appareil fût plein aux deux tiers de sa hauteur; on agitait cette eau de manière à ce que tout prît la même température *i* que l'on notait. — On versait alors dans cette eau un autre poids d'eau chaude connu, à la température *t*; on agitait le mélange jusqu'à ce que tout fût à une même température *f*. Il est aisé, avec ces données, de calculer le poids d'eau que représente l'appareil. Désignons, en effet, par *p* ce poids cherché, par P le poids d'eau à la température *i*, par P' le poids d'eau chaude à la température *t*. On a :

$$(P+p)\times(f-i)=P'(t-f).$$

—Équation d'où il est facile de déduire la valeur de *p* qu'avec

quelques répétitions de l'expérience on obtenait d'une manière suffisamment correcte.

Ces expériences de forage ont été répétées sur différents métaux, et notamment sur le fer doux, jusqu'à ce que j'obtinsse des résultats réguliers avec chacun. Il me semble inutile d'en indiquer les détails élémentaires. Il me suffira de dire que, malgré tous les soins pris, les petites différences entre les équivalents mécaniques obtenus pour chaque cas pouvaient être tout aussi bien attribuées à des erreurs expérimentales qu'à des variations intrinsèques, et que l'équivalent moyen obtenu était à très-peu près $425^{k.m.}$



CHAPITRE III.

RELATIONS DU TRAVAIL QUE PRODUIT, ET DU CALORIQUE QUE FAIT DISPARAITRE L'EXPANSION DE LA VAPEUR D'EAU.

Les expériences de M. Regnault ont démontré que la somme de calorique latent de la vapeur d'eau saturée croît avec la tension, et que cet accroissement peut être représenté, très approximativement, par l'équation empirique et provisoire :

$$C = 606,5 + 0,305\, t$$

où t est la température de la vapeur staturée et où C est la somme de calories représentée par un kilog. de cette vapeur. — D'après cela, et si l'on se rappelle que la capacité calorifique de la vapeur est constante et à peu près 0,45, selon d'autres recherches de M. Regnault, il semble que la vapeur, en passant par expansion d'une pression à une autre plus faible, devrait prendre une température supérieure à celle qui répondrait à la tension nouvelle; il semble que cette température devrait s'exprimer approximativement par la formule $t' = (606,5 + 0,305\, t) : 0,45$, et qu'ainsi de la vapeur passant par exemple de 5 atm. à 1, devait tomber de 153° à $(606,5 + 0,305 . 153) : 0,45 = 145^{\circ}$, et non à 100°, qui est la température de saturation pour 1 atm. Eh bien! de ces inductions rien n'est juste. Lorsque, sans y ajouter ou en soustraire du calorique, on laisse de la vapeur saturée se détendre et diminuer de pression, on observe qu'elle se trouble, qu'il s'y forme un brouillard, et qu'en un mot elle se condense partiellement; et si l'on mesure son calorique latent après la détente, on trouve qu'il a

diminué très notablement. Ainsi la vapeur saturée que l'on condense sans lui permettre de changer de pression, rend intégralement tout le calorique qu'il avait fallu pour la produire; tandis que, bien au contraire, si on lui permet de baisser de pression, par suite d'une augmentation de volume, elle rend des quantités de calorique moindres, et d'autant moindres, que la diminution de tension a été plus considérable. J'ai signalé avec les détails nécessaires ces divers phénomènes dans le Bulletin 133, de la Société industrielle de Mulhouse (Haut-Rhin). Depuis cette époque, j'ai eu occasion de répéter toutes mes expériences et de les rendre plus exactes et plus concluantes. Je les ai étendues à la vapeur d'eau surchauffée, c'est-à-dire portée à une température supérieure à celle qui répond au point de saturation. C'est le fruit de ces nouveaux travaux que je viens exposer ici avec tous les développements que comporte un groupe de phénomènes aussi riches en conséquences théoriques.

La machine à vapeur avec détente et condensation est l'appareil le plus convenable, et peut-être le seul propre à nous servir à étudier les relations qui existent entre l'expansion de la vapeur, la force ainsi produite, le calorique disparu, etc., etc. Elle nous permet, d'une part, de doser très exactement la vapeur employée, et d'autre part, de maintenir parfaitement cette vapeur dans les mêmes conditions, pendant un temps assez long pour rendre une expérience concluante. Lorsqu'elle est bien construite, la vapeur la traverse sans chocs trop notables, sans changements brusques de vitesse, et après avoir rendu en travail mécanique tout ce qu'elle est capable de rendre. Et de plus, l'évaluation du calorique qui disparait pendant ce travail, y est facile à déterminer au moins approximativement. Désignons par P le poids de vapeur dépensé par coup de piston, par exemple; par t, la température de cette vapeur au point de saturation; par T, sa température à l'entrée dans le cylindre, si elle est surchauffée; par f, la température à laquelle on condense.

Le nombre de calories disponible de cette vapeur sera :

$$N = P\,(606,5 + 0,305\,t + (T - t)\,0,45 - f)\ A.$$

—C'est celui qu'on devrait retrouver dans l'eau de condensation, s'il n'y avait ni addition, ni soustraction de calorique pendant le travail.

Désignons, d'un autre côté, par V le poids d'eau froide injectée dans le condenseur par coup de piston, et par i la température initiale de cette eau dont la température finale est f, nous avons :

$$N' = V\,(f - i).$$

pour expression du nombre de calories qui s'échappe réellement de la machine avec l'eau condensée. En faisant toutes les corrections nécessaires pour les pertes de calorique par les parois, etc., on trouve que N est toujours plus grand que N', et la différence indique évidemment le nombre de calories qui disparait pendant l'expansion de la vapeur. En divisant par ce nombre la force produite pendant la détente, on a donc la valeur de l'équivalent mécanique. La détermination de cette valeur repose, comme on voit, sur le dosage exact de la vapeur consommée par le cylindre moteur, et de l'eau rejetée du condenseur, et elle ne semble pas devoir présenter de difficultés sérieuses. Cependant, et c'est ce que la description détaillée de mes recherches fera le mieux juger, lorsqu'on passe du principe à l'application, on rencontre des obstacles de toute nature, qu'il n'est pas toujours possible d'éluder entièrement. Je ferai simplement remarquer pour le moment que l'on ne peut opérer correctement que sur des machines d'une très-grande puissance, puisqu'autrement la différence entre N' et N se noie en quelque sorte dans les corrections accessoires des résultats. Or, on conçoit qu'il n'est pas facile de convertir un moteur d'une centaine de chevaux de force en un véritable instrument de physique dont on est le maître. L'expérimentateur, par le fait, se trouve ici à peu près dans le cas de celui qui veut étudier les phénomènes naturels : au lieu de les créer à volonté comme le fait le physicien dans son cabinet, il est obligé de les attendre et de les guetter au passage. Mes expériences ont été faites sur deux moteurs. L'un était une machine du système Woolf, ou à deux cylindres réunis : la vapeur agissait d'abord en pleine pression dans l'un d'eux; puis elle passait dans l'autre, beaucoup plus grand, où

elle agissait exclusivement par détente ; ces deux cylindres étaient placés dans une enveloppe de Watt, ou chemise à vapeur. La vapeur de la chaudière arrivait au bas de cette enveloppe, et en arrière du grand cylindre qu'elle lèchait ainsi que le petit, avant de pénétrer dans le haut ou le bas de celui-ci. Cette machine était par suite à détente fixe, c'est-à-dire que par la construction même, la vapeur y subissait toujours le même accroissement de volume. L'autre moteur était à un seul cylindre, sans enveloppe à vapeur ; la détente pouvait y être variée à volonté par un mécanisme très-commode que je pense inutile de décrire ; la vapeur agissait d'abord en pleine pression, puis, à un point déterminé de la course du piston, elle était coupée, et le poids introduit se détendait pendant le reste de la course. J'indiquerai, à mesure qu'il sera nécessaire, les autres détails de construction de ces deux machines. — Cependant, je dois dire de suite que leurs chaudières étaient pourvues d'appareils qui me permettaient d'employer à volonté de la vapeur surchauffée jusqu'à 250° au lieu de vapeur saturée.

I. Détermination de la quantité de calorique envoyée au cylindre.

Dosage du poids de vapeur par coup de piston.

La machine, munie d'un compteur exact qui relevait le nombre d'oscillations, marchait au moins 12 heures consécutives, à la même pression, à la même vitesse, à la même détente, etc., etc. En un mot, elle était tenue à un régime constant pendant un temps suffisant. Au commencement de la journée, on marquait le niveau de l'eau dans la chaudière, et pendant le travail on mesurait directement la quantité d'eau alimentaire consommée, en faisant aspirer la pompe d'alimentation dans un tonneau jaugé. Au bout de la journée, on ramenait le niveau de la chaudière au point primitif. En un mot, la machine marchait à un régime aussi constant que possible, pendant un temps assez considérable pour qu'on pût regarder comme très-petite l'erreur résultant d'un défaut dans le rétablissement parfait du niveau primitif de l'eau dans la chaudière. — Le maintien d'un régime constant pendant toute la durée du jaugeage de l'eau évaporée est, on le conçoit, une condition *sine quâ non* de réussite. — L'établissement industriel que faisaient marcher

les pompes dont je parle était très-considérable, et avait besoin d'une force beaucoup plus grande que celle qu'elles donnaient : cet excès de force était fourni, soit par des moteurs hydrauliques, soit par une autre machine à vapeur ; en sorte que la machine en expérience pouvait être, comme je l'ai dit, tenue dans le même état de force aussi longtemps qu'il était nécessaire. Sa détente et l'ouverture du robinet de vapeur pouvaient rester invariables ; sa vitesse restait à très-peu près constante aussi, puisque les moteurs supplémentaires étaient munis de bons régulateurs, et que sa stabilité était une des conditions de bonne marche de l'établissement. En supposant donc la pression constante aussi, la machine donnait la même force, pendant toute la durée d'un essai. — Le maintien de la pression dépend surtout de la régularité du feu, et par conséquent de l'habileté du chauffeur. On peut dire qu'une constance absolue est impossible en dépit de l'adresse de cet ouvrier, par plusieurs raisons accessoires qui ne dépendent pas de lui ; cependant, pour le cas qui nous occupe, et avec les pressions de trois et demie jusqu'à quatre et demie atmosphères, qui étaient nécessaires, les plus forts écarts de la pression normale ne s'élevaient pas à un huitième d'atmosphère, en plus et en moins, et c'était dans des cas exceptionnels qu'avait lieu l'écart maximum ; l'écart moyen, en plus ou en moins, n'était pas d'un vingtième d'atmosphère.

En nommant π le poids total d'eau injectée pendant la journée, et D le nombre total de coups de pistons on a $\frac{\pi}{D} = P'$ pour la dépense moyenne par coup de piston, à un degré d'approximation près, qui repose sur l'invariabilité du régime de la machine. — Ainsi qu'on le voit, le seul élément dont la constance parfaite fût impossible, était la pression de la chaudière : en poussant au plus haut les chances d'erreur, je crois être arrivé dans mes recherches à les limiter à un deux-centième près. Du moins, des essais faits plusieurs fois dans les mêmes conditions n'ont jamais différé même de cette fraction pour la valeur finale de P'. J'ai marqué d'un accent le poids P' parce que le quotient $\pi : D$ ne peut être pris que dans un seul cas pour la valeur exacte de la dépense de vapeur par coup de piston. Ce cas est celui où la vapeur est surchauffée, et par suite séchée complètement avant d'arriver au cylindre. Pour

plus de concision, je vais m'occuper de suite des divers cas particuliers où j'ai expérimenté, et indiquer les corrections qui leur étaient inhérentes.

1° *Machine à un cylindre.*

Ce cylindre était sans enveloppe de Watt : la vapeur de la chaudière entrait directement au-dessus et au-dessous du piston. Lorsqu'on opérait avec vapeur surchauffée, elle était parfaitement privée d'eau. En observant fréquemment un thermomètre placé tout près de la boîte à distribution, et plongé dans la vapeur, on avait une moyenne des températures auxquelles la vapeur avait été chauffée, et cette moyenne était assez correcte pour que la température ne variât pas de 10° sur 240°. — Dans ce cas, la formule

$$\frac{\pi}{D}(606,5 + 0,305\,t + 0,45\,(T - t) - f) = N$$

représentait très-exactement le nombre de calories amené par la vapeur au cylindre.

Lorsque la même machine marchait avec la vapeur saturée, le nombre $\Pi : D$ ne pouvait plus être pris en totalité pour la dépense de vapeur par coup de piston. De quelque manière en effet que soit construite une chaudière, la vapeur qu'elle produit entraîne toujours de l'eau à l'état de poussière ou de globules ; la quantité relative de cette eau vésiculaire varie énormément d'un générateur à l'autre : tandis qu'elle s'élève souvent à 20 p. % du poids de la vapeur, elle peut, dans de bonnes conditions, descendre à 1 p. % ; elle varie d'ailleurs aussi pour la même chaudière, selon la quantité de vapeur qu'on est obligé de produire en un temps donné. Il est clair que notre quotient P' contient à la fois le poids de vapeur et d'eau vésiculaire emporté, et que pour arriver à un résultat correct, il est nécessaire de déterminer directement la valeur de l'eau vésiculaire. C'est à quoi je suis parvenu pour mes deux machines, en faisant, pendant le travail même, une prise de vapeur aussi près que possible de la boîte de distribution, ou du cylindre, et en faisant passer, sans modification de pression, cette vapeur par un

serpentin plongé dans un bain d'eau dont le poids et la température initiale étaient connus et dont on mesurait la température finale. — Le poids de ce petit calorimètre lui-même, ou pour mieux dire, le poids d'eau qu'il représentait comme capacité calorifique, était déterminé une fois pour toutes ; l'eau qui se condensait dans le serpentin était pesée à la fin de chaque opération. Ce procédé d'évaluation de l'eau vésiculaire était, quant à l'appareil lui-même, analogue à celui qui a servi à M. Regnault, pour ses recherches sur le calorique latent de la vapeur, au degré de précision près, degré qu'il eût d'ailleurs été superflu ici de chercher à atteindre. — Soit P le poids d'eau contenu dans le calorimètre avec celui qui représente l'instrument lui-même ; soient t et T les températures initiale et finale de l'eau ; soit Π le poids d'eau condensé dans le serpentin, à la température T' et désignons par p le poids inconnu d'eau en poussière contenu dans la vapeur. La vapeur qui se condense à la température f' cède Π $(606,5 + 0,305\,t - f')$ de calories ; l'eau vésiculaire qui descend de t à f' en cède $p\,(t-f')$ calories ; le calorimètre et son eau montent de i à f : il gagne donc P $(f-i)$. La quantité cédée devant être ici exactement égale à la quantité gagnée d'autre part, on a :

$$P\,(f-i) = p\,(t-f') + \Pi\,(606,5 + 0,305\,t - f')$$

équation dont il est aisé de tirer la valeur de p.

Je pense qu'il est inutile d'indiquer ici tous les chiffres et les autres éléments de ce genre d'expérience, que je n'ai faite qu'en vue d'une correction très-faible pour les chaudières sur lesquelles j'ai opéré. J'ai trouvé que sur un kilog. de liquide condensé dans le serpentin, il y avait moyennement de 14 à 17 gr. d'eau sous forme de poussière. — La correction très-approximative à faire sur $\Pi : D$ était donc de un et demi p. % ou 0,015 ; ce qui nous donne, pour la dépense réelle par coup de piston, $P = 0,985\ \Pi : D$, et pour le poids d'eau entraînée $p = 0,015\ \Pi : D$. Le nombre de calories disponible amené au cylindre par la vapeur était donc très-approximativement :

$$N = \frac{\pi}{D}\left(0,985\,(606,5 + 0,305\,t) + 0,015\,t - f\right).$$

2° Machine Woolf, où à deux cylindres et à enveloppe de Watt.

J'ai déjà dit que le bas de l'enveloppe à vapeur était muni d'un tuyau de retour d'eau à la chaudière : toute l'eau vésiculaire amenée par la vapeur se déposait dans l'enveloppe, et rentrait constamment à la chaudière.

Le petit cylindre était donc alimenté avec de la vapeur sèche : c'est ce dont je me suis assuré directement en examinant cette vapeur à l'aide du serpentin dont il a été question ci-dessus. Il semble que la formule (A) avec ($T=t$) représente par suite tout le calorique envoyé au cylindre. Il s'en faut beaucoup cependant qu'il en soit ainsi. Pendant le travail de la machine il se dépose dans l'enveloppe une grande quantité d'eau dont la production repose sur trois raisons très-différentes : 1° une partie est due, comme il vient d'être dit, à ce que la poussière d'eau amenée artificiellement se sépare de la vapeur dans l'enveloppe, par suite de la diminution de vitesse très-considérable du gaz aqueux qui permet aux parties en suspension mécanique de tomber par leur propre poids ; 2° une autre partie est due à la condensation de la vapeur contre les parois de l'enveloppe qui, en dépit de tous les soins que l'on prend pour la protéger à l'aide de matières isolantes, éprouve cependant toujours un refroidissement au contact de l'air ambiant. J'indiquerai plus loin comme il faut tenir compte de cette condensation ; 3° enfin une portion de cette eau, et la plus importante à tous égards, se produit par suite de la condensation de la vapeur de l'enveloppe contre les parois mêmes des cylindres qui y sont plongés. Deux causes agissent en effet dans une machine à détente, de manière à refroidir les parois des cylindres : la vapeur baisse de température pendant la détente, et se chauffe aux dépens des parois des cylindres qui ont nécessairement la température de la vapeur qui y afflue ; la vapeur baisse, encore bien plus, de température dans le cylindre, au moment où elle se détend en se précipitant dans le condenseur. La vapeur interne des cylindres est donc continuellement chauffée par la vapeur externe qui circule dans l'enveloppe. Je sortirais de mon sujet si je m'étendais ici sur les conséquences de cette action puissante de la vapeur de l'enveloppe sur la marche du moteur ; les personnes qui désirent des détails

sur cette intéressante question, les trouveront dans le bulletin 13 de la Société Industrielle de Mulhouse, où j'ai analysé l'utilité de l'enveloppe de Watt. — Qu'il me suffise de dire qu'une machine Woolf perd 20 p. °/₀ de sa force lorsqu'on fait arriver la vapeur directement de la chaudière au petit cylindre, au lieu de la faire d'abord passer par l'enveloppe. Mais je dois ici, au contraire, indiquer avec soin le procédé par lequel j'ai évalué la quantité de calorique que la vapeur des cylindres reçoit de la vapeur de l'enveloppe.

Au bas de l'enveloppe, j'ai adapté verticalement un tube en cristal, de manière à connaître le niveau interne de l'eau; à l'aide d'une opération préalable, je me suis assuré de combien l'eau montait dans le tube, lorsqu'on versait dans l'enveloppe une quantité connue d'eau. Puis j'ai fermé le robinet du tuyau de retour d'eau, et j'ai laissé l'eau s'accumuler dans l'enveloppe pendant un temps déterminé. Cette opération ayant été faite pendant que la machine travaillait à son régime expérimental, et ensuite pendant qu'elle était au repos avec l'enveloppe toujours remplie de vapeur, à la même tension, on savait donc tout ce qui se condensait par suite du seul refroidissement des parois externes, et ce qui se condensait par suite de l'action réunie des refroidissements externes et internes. En retranchant donc du poids total d'eau déposée pendant la marche, celui de l'eau vésiculaire, déjà déterminé d'avance et celui de l'eau condensée pendant que la machine était arrêtée, on a la valeur exacte de la quantité de vapeur condensée contre les parois mêmes des cylindres, par suite de l'action de la détente. Une fois ce poids connu, il est facile de calculer le nombre de calories qu'a reçu la vapeur du cylindre, pendant qu'elle se détend ou se jette dans le condenseur. En effet, l'eau produite par la condensation dans l'enveloppe, se trouve sans cesse en contact avec la vapeur qui y afflue; elle a donc nécessairement la température maxima de cette vapeur, et rentre avec elle dans la chaudière. En désignant donc par p', le poids d'eau dû à l'action interne des cylindres, on a :

$$n = p' (606{,}5 + 0{,}305\, t - t)$$

pour le nombre de calories cherché, t étant la température de la vapeur saturée.

C'est à l'aide de ces données et de cette formule qu'ont été calculés les nombres de la colonne XIX de notre grand tableau D.

Lorsque la machine Woolf travaillait avec vapeur surchauffée, il ne se déposait plus une trace d'eau dans l'enveloppe de Watt : la vapeur perdait simplement une partie de son excès de chaleur au contact des parois des cylindres et de l'enveloppe. En entrant dans celle-ci elle avait, par exemple, 240° ; à son entrée dans le petit cylindre elle n'avait plus que 200°. La vapeur qui se détendait dans l'intérieur s'échauffait donc aux dépens de la vapeur qui affluait dans l'enveloppe. Mais nous n'avons pas à nous occuper de cette action sous forme de correction, puisqu'il n'y avait ici qu'un simple échange et que la chaudière n'envoyait ni plus ni moins que le poids $\Pi : D$ à la température T.

Il est un cas cependant où, tout en opérant avec de la vapeur surchauffée, il était nécessaire de recourir à une correction assez importante. Au lieu de faire affluer dans l'enveloppe de Watt la vapeur surchauffée consommée par le petit cylindre, j'y ai fait arriver la vapeur saturée ; puis, conduisant cette vapeur à l'appareil de surchauffe, je la ramenai directement à la boîte de distribution du petit cylindre (1). Toute la vapeur consommée par le petit cylindre circulait donc ainsi dans l'enveloppe, allait se surchauffer et puis seulement était introduite dans les cylindres moteurs. Bien qu'avec cette disposition, la vapeur du petit cylindre fût pendant la première période du mouvement beaucoup plus chaude que celle de l'enveloppe, l'inverse avait lieu à la seconde période, c'est-à-dire lorsque la vapeur passait du petit cylindre dans le grand et se détendait ; l'inverse avait surtout lieu pour la vapeur qui se détendait dans le grand cylindre au moment où elle se jetait dans le condenseur. En un mot, il se condensait dans l'enveloppe un poids de vapeur beaucoup plus considérable que celui qui était dû au seul refroidissement externe des parois. La valeur de l'enveloppe cédait encore du calorique à la vapeur interne des cylindres, et par suite se condensait en partie bien moindre à la vérité que quand le petit cylindre consommait de la vapeur simplement saturée.

(1) 12e Expérience du tableau.

L'expérience ici était d'ailleurs conduite, comme je l'ai dit plus haut, en laissant l'eau s'accumuler pendant un temps connu dans le bas de l'enveloppe. En retranchant de la quantité totale celle que représentait l'eau en poussière amenée mécaniquement, et celle de l'eau produite par suite de refroidissement externe, on avait la dose exacte de vapeur condensée par l'action rafraichissante des cylindres eux-mêmes. Et la formule :

$$p' (606,5 + 0,305\, t - t)$$

nous donne encore le nombre de calories supplémentaires, ajouté à la vapeur des cylindres pendant le travail.

II. Détermination de la quantité de calorique libre qui s'échappe avec l'eau de condensation.

Cette détermination, bien que relativement plus simple que les précédentes, est pourtant celle, peut-être, qui m'a coûté le plus de peine et de tâtonnements. Voici la méthode finale qui m'a donné les résultats les plus réguliers.

La machine étant mise aux mêmes pression, détente, vitesse et surchauffe (lorsqu'on n'employait pas la vapeur saturée), on prenait pendant 10 min. de demi en demi minute la température de l'eau rejetée du condenseur, en comptant soigneusement le nombre de coups de piston. Puis, à un moment donné, on dirigeait cette eau dans un grand réservoir cylindrique qui servait de jaugeur; on comptait encore le temps et le nombre de coups de piston; on observait toujours la température de demi en demi minute. Lorsque le cuveau était aussi plein qu'il pouvait l'être sans déborder, on laissait l'eau du condenseur suivre de nouveau sa voie habituelle; mais pendant 10 minutes encore on relevait les températures et l'on comptait les coups de piston. De cette manière, on arrivait d'une part à une moyenne correcte de température, surtout lorsque la machine était maintenue parfaitement à son régime, et que par suite les plus fortes oscillations de température ne dépassaient pas un demi degré.

D'autre part, en raison des dimensions du réservoir de jauge, on obtenait aussi un débit moyen par coup de piston, assez approxima-

tif. Soit W le poids total reçu dans le réservoir pour le nombre M de coups de piston, le poids rejeté par coup de piston sera W : M ; et comme ce poids se compose du poids d'eau injectée et du poids de vapeur condensée, il faut en retrancher ce dernier pour avoir la valeur V du premier; autrement dit, on a :

$$V = W : M - \Pi : D = W : M - P.$$

La température i ne variait nullement pendant le cours d'une expérience : il suffisait de la prendre au commencement ou à la fin. La base du réservoir cylindrique était assez grande pour que l'eau mît toujours près de 8 à 10 minutes à s'élever d'une hauteur h, déterminée d'ailleurs à la fin de chaque expérience. En nommant S notre base, on a donc en définitive :

$$(S\,h : M - P)(f - i) = N'$$

pour le nombre de calories que l'eau d'injection a gagné par son passage dans le condenseur. Si la vapeur ne perdait pas de calorique en route par son contact avec des corps plus froids qu'elle ; si, d'un autre côté, il ne se produisait pas aussi du calorique qui s'y ajoute, la différence de nos deux nombres N et N' nous indiquerait directement le nombre de calories qui disparaît par le fait de l'expansion du gaz aqueux. Mais il n'y a qu'un très petit nombre de cas où l'on puisse ainsi se dispenser de toute correction. Il est en effet facile d'apercevoir plusieurs des causes qui modifient N. Je vais dire comment je me suis efforcé de les évaluer au moins *approximativement* ; car, il faut bien le dire, il est impossible ici d'employer un autre terme.

1° *Calorique dispersé en route.*

L'eau amenée par la vapeur saturée, et la température de la vapeur surchauffée ayant toujours été mesurées tout près des cylindres, nous n'avons pas de corrections à faire pour ce qui peut s'être perdu à partir des chaudières jusqu'aux corps de pompe ; et il nous suffit d'évaluer ce qui se passe pour ceux-ci.

1° Lorsque la machine Woolf marchait avec vapeur saturée,

l'eau qui se condensait dans l'enveloppe à vapeur, par suite des refroidissements externes, retournait intégralement à sa température maxima dans la chaudière. Il n'y avait donc ici pas de dépense apparente de vapeur par suite de ces refroidissements, et la correction se faisait en quelque sorte d'elle-même. C'est le seul cas où nous n'ayons pas à nous en occuper. Cependant la détermination de la quantité d'eau ainsi condensée, et du calorique perdu par les parois, m'a été fort utile, comme on va voir, pour tous les autres cas.

2° Lorsque la même machine marchait avec vapeur surchauffée, il s'opérait un abaissement de température assez notable dans le gaz aqueux par suite du refroidissement externe : mais comment évaluer celui-ci? Ce ne peut être en prenant pour juste la température de la vapeur à son entrée dans le petit cylindre; elle perdait en général près de 40° dans l'enveloppe; mais cette perte, il s'en fallait beaucoup, n'était pas due aux seuls refroidissements externes. Il fallut avoir recours à tout une autre méthode. Voici celle qui m'a semblé la plus correcte.

La température du local des cylindres étant d'environ 30°, il se condensait par minute dans l'enveloppe 400 gr. de vapeur à $3^{at},75$ et par suite à 145°, lorsque la machine était en repos. Lorsque la machine marchait à la même pression, la température ne pouvait varier, et les pertes par les parois restaient les mêmes aussi. Ces 400 gr. ou $0^k,4$ rentraient à 145° dans la chaudière; la vapeur qui les a produits avait perdu :

$$0,4\,(606,5 + 0,305 \,.\, 145^{\circ} - 145^{\circ}) = 202,29.$$

Calories par minute, ou $\frac{202,29}{47}$ par coup de piston (la vitesse était 47 oscillations par minute); ce qui fait, en opérant la division, $4^c,304$.

Pour faire la correction convenable lorsque la machine marchait avec vapeur surchauffée, j'ai admis que le refroidissement était proportionnel à l'excès de température des parois sur le milieu ambiant, et j'ai par suite posé la proportion :

$$145^{\circ} - 30^{\circ} : 250^{\circ} - 30 :: 4,304 : X, \qquad \text{d'où}\ X = 7,48.$$

Cette estimation, je l'ai dit, ne peut être tenue que pour approximative : mais comme en définitive le nombre en lui-même auquel elle donne lieu n'est que très-faible, l'erreur commise sur ce nombre peut être regardée comme négligeable.

3° Lorsque la même machine marchait avec vapeur directe et enveloppe pleine d'air en repos, la chemise isolante en maçonnerie, que j'avais fait construire autour de cette enveloppe, devenait à peine tiède ; on peut donc négliger, sans crainte d'erreur considérable, les petites pertes qui résultent encore du refroidissement.

4° Je dois en dire autant de la machine à 1 cylindre et sans enveloppe à vapeur. Le cylindre se trouvait protégé par des douves en bois qui laissaient un espace vide de $0^{m.},05$ environ, et qui étaient elles-mêmes environnées à $0^{m.},02$ de distance par un cylindre externe en tôle mince. Les parties supérieure et inférieure de cette espèce de manchon double étaient d'ailleurs fermées convenablement, de manière à ce qu'il ne pût s'établir aucun courant d'air. — La tôle externe n'atteignait guère plus de 20° au-dessus de la température de l'air ambiant. Je pense donc avoir pu, sans inconvénient, ne pas chercher à réduire en chiffres la perte due encore au refroidissement: perte qui certainement ne s'élevait pas à $0^{ca.},25$ par coup de piston.

2° *Calorique produit en route et ajouté à la vapeur.*

Trois causes font qu'il s'ajoute un peu de calorique à la vapeur et à l'eau de condensation pendant le travail de la machine.

Les frottements des pistons moteurs, ceux du piston de la pompe qui ordinairement puise dans un puits l'eau d'injection, et ceux du piston qui extrait l'eau injectée et condensée dans le condenseur, développent évidemment du calorique, qui, en dernière analyse, s'ajoute à l'eau rejetée du condenseur, et qui augmente par suite notre nombre N'. Si la valeur de ces divers frottements pouvait être déterminée exactement, rien ne serait plus facile que d'en déduire celle du nombre de calories produit. Il suffirait de multiplier le chemin parcouru par les pistons par l'effort qu'ils ont à vaincre, et de diviser le produit par notre nombre $371^{k.m.},6$ que nous avons trouvé pour la

valeur de l'équivalent mécanique dans le frottement. C'est là effectivement le procédé auquel j'ai eu recours pour la correction qui nous occupe actuellement. Le résultat de cette application d'un principe très-juste ne peut être regardé tout au plus que comme une première approximation, puisque l'on est fort loin de connaître, aussi précisément qu'il le faudrait, la valeur du frottement des diverses pièces de nos pompes à vapeur. — Je suis parti de cette donnée généralement admise que dans une machine bien tenue, la résistance due au frottement des pistons est d'environ 400$^{k.}$ pour chaque mètre carré de surface des pistons. C'est là sans doute une donnée bien empirique et sujette à caution. Cependant, en raison de la petite valeur de la correction dont il s'agit, une erreur de moitié en plus ou en moins serait de peu d'importance, et l'on peut au moins provisoirement l'accepter comme juste. Le piston de la machine à un cylindre ayant par exemple 0$^{m.}$,6 de diamètre, et par suite 0$^{\overset{2}{m}.}$,28 environ de section, le frottemement serait de 400 . 0,28 = 112$^{k.}$; la course étant de 1^{m}, 8, le travail dépensé en frottement serait de 112. 1,8 = 201$^{k.m.}$,6, et le quotient de ce produit par 371,6 est de 0$^{c.}$,542. — Pour des expériences qui, sous tous les autres rapports, seraient parfaitement exactes, ce nombre, supposé faux d'une moitié en plus ou en moins, serait déjà assez peu important. Mais, ainsi que nous le verrons, il l'est moins encore pour le cas présent, où d'autres chances inévitables d'erreurs peuvent le balancer.

Le frottement des pistons moteurs est de beaucoup supérieur à celui des deux autres pistons, en raison de la grandeur même des sections. Comme je prenais la température de l'eau injectée, au sortir de la pompe d'aspiration, je n'avais pas d'ailleurs de correction à faire de ce côté.

2° L'eau d'injection, en se précipitant dans le condenseur, s'échauffe certainement. Mais la correction à laquelle on serait conduit en y ayant égard, est tellement faible qu'il n'y a pas lieu de s'y arrêter. Cette eau, en effet, se jette dans le condenseur sous une pression moyenne de 8$^{m.}$ de hauteur (0$^{m.}$,6 de mercure) ; autrement dit, elle tombe sans cesse de 8$^{m.}$, elle produit donc environ $\frac{8}{371,6}$ de calorie par seconde, ou, ce qui est la même chose ici, elle s'échauffe de $\frac{8}{371,6}$ de

degré. Echauffement qui échapperait à nos instruments les plus exacts et les plus sensibles.

3° Une autre cause beaucoup plus énergique de production de chaleur, ce sont les pertes de force vive qu'éprouve la vapeur elle-même par les divers étranglements qu'elle subit, mais surtout par l'énorme perte de vitesse qu'elle éprouve en se précipitant dans le condenseur. Dans toutes mes expériences j'ai vu cette vapeur, *pourvu qu'elle fût sèche*, indiquer 10° ou 20° de plus que ce qui répondait à sa tension maxima. Il ne s'agit donc pas ici d'une simple induction théorique, mais d'un fait expérimental. Malheureusement le fait est plus facile à constater qu'à réduire en chiffres corrects; et j'aurais craint de tomber par trop dans l'arbitraire en cherchant à le traduire ainsi.

Nous venons de voir comment j'ai déterminé expérimentalement le nombre de calories que perd la vapeur sur son calorique latent par le fait de la détente. Avant de faire aucune réflexion critique sur tout ce qui précède, je vais indiquer maintenant comment j'ai cherché à évaluer la force motrice due à cette détente.

Il ne pouvait pas être question un instant de calculer cette force à l'aide des formules admises jusqu'ici pour établir une relation entre deux volumes successifs qu'occupe un même poids de vapeur, et les deux pressions y répondant. Toutes ces formules, nous le verrons, sont nécessairement fausses, et ne méritent pas même le nom de formules empiriques. D'un autre côté, en se bornant à essayer une machine au frein de Prony, on ne connaît, d'une part, que le travail effectif qu'elle produit, et non le travail disponible de la vapeur; et d'autre part, il est clair que la force relevée au frein est la somme de l'effet de la vapeur en pleine pression et de la détente. Le frein ne peut donc ici servir que subsidiairement. L'idée la plus naturelle qui vienne à l'esprit, c'est de recourir à l'ingénieux petit appareil connu sous le nom d'Indicateur de Watt, inventé par ce grand homme pour se rendre compte de l'état de la vapeur dans les cylindres.

Bien que cet instrument soit aujourd'hui généralement connu et

employé, je crois devoir en rappeler la construction la plus essentielle, puisque j'aurai à critiquer les résultats qu'il donne. Dans un petit cylindre que l'on visse sur une ouverture pratiquée au couvercle du cylindre de la machine à vapeur, se meut librement, à frottement très-doux, un piston dont la tige est guidée parallèlement à elle-même, et qui est commandée par un ressort attaché par son extrémité libre au cylindre. Lorsque le petit piston avance ou recule dans le cylindre, le ressort se tend de plus en plus, et fait ainsi sans cesse équilibre à la force qui pousse le piston. A la tige de celui-ci se trouve adaptée une pièce en équerre qui porte un crayon dont la pointe va presser doucement sur la surface d'un tambour cylindrique à axe parallèle à celui du cylindre. Ce tambour peut tourner autour de son axe. Un ressort interne tend à le ramener toujours à la même position : une corde à boyau enroulée autour de sa partie inférieure, et attachée d'autre part à l'extrémité de la tige du piston moteur, donne à ce tambour un mouvement circulaire de va-et-vient.

Il résulte de cette disposition générale que notre piston, pressé d'une part par la vapeur, et d'autre part, en sens opposé, par le ressort, prend à chaque moment la position où les deux efforts contraires sont en équilibre. Le crayon se meut donc en avant et en arrière sur la surface du tambour et dans la direction de l'axe ; le tambour, au contraire, glisse sous lui dans une direction perpendiculaire. Il se trace donc sur le papier qui recouvre le tambour une courbe fermée dont les ordonnées font connaitre la pression de la vapeur dans le grand cylindre, et dont les abcisses indiquent le point de la course qui répond à cette pression. On gradue d'avance l'instrument en déterminant combien une pression de 1, 2, 3[at.] sur le petit piston fait avancer le crayon. — Désignons par X, l'ordonnée qui répond à l'action de 1[at.] de pression sur notre petit piston, S, la surface du piston moteur, L, la course totale de celui-ci, et l, la longueur de l'abcisse maxima de notre courbe; nommons de plus x et y les ordonnées et les abcisses qui se correspondent sur la figure fermée. Le travail disponible de la vapeur pour une course entière du piston moteur aura évidemment pour expression :

$$T = \int 10333\, y s \frac{dx}{X} \cdot \frac{L}{l},$$

c'est-à-dire que nous aurons la valeur de ce travail en multipliant la surface de notre figure par le nombre constant $\frac{SL}{Xl}$ 10333 (10333 étant la charge en kilog. d'une pression d'une atmosphère sur une surface d'un mètre carré).

Comme la seule inspection des figures obtenues avec cet appareil nous fait connaître le point de la course du piston où la vapeur cesse d'affluer de la chaudière, et où commence par suite la détente, il est aisé de calculer à part le travail dû à cette détente, et celui qui est dû à l'action de la pleine pression. J'ai dit que la position du petit piston résulte de l'état d'équilibre de la pression de la vapeur et de la tension du ressort. S'il en était absolument ainsi, la courbe tracée exprimerait rigoureusement tout le travail dont est capable la vapeur admise par coup de piston. Malheureusement il s'en faut de beaucoup que le ressort soit ici la seule puissance de résistance en jeu.

Quelque bien construit que soit l'Indicateur de Watt, ses diverses pièces éprouvent des frottements qui résistent au mouvement du piston aussi bien que le ressort: résistance passive, dont il est impossible de connaître la valeur pour chaque cas. Il résulte de là que la figure tracée est toujours trop petite. Ainsi, pour citer les cas particuliers de l'instrument, très-bien fait du reste, dont je me suis servi, les courbes que j'obtenais n'ont jamais indiqué une force disponible plus grande que la force effective que me donnait l'expérience au frein. Ce qui prouve que, par un hasard assez singulier, les frottements etc., etc., de mon Indicateur étaient précisément les mêmes proportionnellement que ceux des machines que j'ai essayées.

Il semble, d'après cette critique, que l'Indicateur à piston ne pouvait guère nous convenir à déterminer la force motrice disponible due à la détente dans une machine; car nous sommes encore bien loin de savoir déterminer exactement pour chaque cas le rendement d'un moteur à vapeur, autrement dit, le rapport qui existe entre le travail disponible et le travail effectif. Cependant ici nous arrivons au moins à une approximation à l'aide d'expériences convenables faites sur tel ou tel moteur que nous étudions.

un élément était positivement connu : à savoir la pleine pression sur la courbe donnée par le petit cylindre, la contrepression du condenseur sur la courbe du grand cylindre. En comparant ces deux éléments connus exactement d'une part, et tracés inexactement d'autre part par le crayon de l'instrument, on peut déterminer bien juste le rendement de l'Indicateur lui-même, autrement dit la perte qu'éprouve par ses frottements l'action de la vapeur sur le petit piston.

L'instrument, une fois titré de la sorte, peut servir à relever très-sensiblement juste l'effet disponible dû à la détente seule ; et il peut s'appliquer avec de bons résultats à la machine à un cylindre, pour y séparer ce qui est dû à l'action de la vapeur en pleine pression de ce qui est dû à la détente seule.

C'est à ces divers moyens combinés que j'ai eu recours pour déterminer, aussi bien que cela était possible, le rendement total des deux machines sur lesquelles j'ai expérimenté, le rendement de mon Indicateur de Watt, et enfin les divers effets disponibles de la vapeur pendant la détente. Ces derniers, notamment, ont été calculés en augmentant d'un quart les chiffres obtenus en déterminant le travail de la détente d'après les surfaces de nos courbes répondant à cette partie de la course des pistons : j'ai en effet reconnu que je pouvais admettre 70 à 75 p. °/₀ pour le rendement de ce petit appareil. Je crois inutile d'indiquer ici les chiffres mêmes qui ont servi d'éléments à mes calculs, ni de chercher à reproduire graphiquement les courbes dont j'ai eu à déterminer les surfaces. Ce dessin, d'une part, ne pourrait être rendu assez identique aux types pour servir lui-même à un calcul, et dès lors les chiffres de détail qui en sont ressortis ne pourraient être d'aucun usage. Je me suis par cette raison étendu très longuement sur la méthode en elle même que j'ai suivie, afin que l'on puisse en juger la valeur. Je dirai seulement ici que, ne pouvant par une voie expérimentale arriver à l'exactitude rigoureuse, j'ai fait tous mes efforts pour arriver à une approximation, et surtout pour poser les limites de cette approximation. — Nous avons déjà vu que le rendement maximum de nos deux pompes ne pouvait s'élever à 86 p. °/₀. D'après l'ensemble de mes investigations, à l'aide du frein, de l'In-

dicateur de Watt, et de manomètres appliqués aux cylindres, je dirai aussi que ce rendement n'est pas non plus descendu au-dessous de 65 p. °/₀, dans les cas où j'ai opéré. Le nombre de 0,75, que j'ai admis pour le rendement de mon indicateur, peut n'être pas correct; mais en tous cas les erreurs auxquelles il a pu me conduire, sont ainsi bornées entre deux limites inférieure et supérieure, sans doute bien écartées, mais pas assez cependant pour enlever sa signification à la valeur de l'équivalent mécanique qu'ils ont ensuite servi à calculer. — En un mot, les chiffres qui, dans la colonne XXV, indiquent le travail disponible dû à la détente de la vapeur, sont justes à un cinquième près au moins, et d'après la concordance des divers procédés d'investigation que j'ai employés, et que je viens de décrire, je crois pouvoir dire que cette exactitude va beaucoup plus loin qu'au cinquième près.

Je viens d'indiquer et de limiter, autant qu'il m'a été possible, l'incertitude qui, dans le tableau D, peut exister sur l'exactitude des chiffres de la colonne XXV.

Les nombres que donne la colonne XXVI pour valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur, diffèrent tellement de ceux qui sont admis généralement déjà, et que j'ai trouvés, pour le même élément, dans mes recherches sur le frottement, qu'il m'importe maintenant d'examiner aussi les chances d'erreur qu'a pu présenter, dans mes recherches, la valeur des deux nombres N et N' dont la différence divisant le travail de la vapeur, nous donne l'équivalent mécanique.

Comme la différence entre N et N' est assez petite relativement à ces deux nombres eux-mêmes, il en résulte qu'une erreur, même assez faible, en produirait une très grande sur leur différence.

La détermination de N' ou du nombre de calories qu'emporte l'eau de condensation de la machine à vapeur, repose sur une expérience très simple. L'eau rejetée du condenseur était reçue dans une cuve cylindrique qui se remplissait de 1^{m} de hauteur, et un accroissement de 0$^{m.}$,005 de niveau de l'eau dans cette cuve ayant été très-facile à apprécier, l'erreur possible commise dans cette jauge

ne s'élève pas à un deux-centième. — Il ne pouvait y avoir d'erreur non plus sur la valeur de la température initiale de l'eau d'injection. Quant à la valeur finale de la température de cette eau, elle résultait, comme je l'ai dit, de la division de la somme d'au moins trente températures par le nombre de ces observations ; et comme les diverses observations, lorsque l'opération était bien conduite, ne différaient pas de 0°,5, il s'en suit que la moyenne obtenue peut être regardée comme rigoureusement juste. Pour que N' devînt une valeur très-approximative, il suffisait donc de placer, pour chaque expérience, la machine dans les conditions où elle se trouvait pendant l'expérience destinée à déterminer le poids de vapeur dépensé par coup de piston. C'était là un point facile à atteindre. — Je pense d'ailleurs n'avoir pas besoin de dire que, pour chaque cas, l'expérience était répétée au moins 4 fois dans la journée, et recommencée jusqu'à ce qu'il y eût concordance dans les résultats.

La détermination de N, ou du nombre de calories envoyées au cylindre, présente plus de chances d'erreur que l'opération précédente ; mais en même temps les erreurs possibles sont en définitive très-petites. Le nombre total de coups de piston, la durée du travail étaient faciles à connaître sans faute à un dix-millième près ; la détente de la machine, les orifices d'admission, etc. etc., restaient invariables ; une vitesse constante était une des premières exigences de l'établissement industriel que menait la pompe : il ne peut donc y avoir de ce côté non plus de défectuosité sensible. Le seul élément essentiel qui pût varier, c'était la pression de la chaudière. Or de cet élément dépendaient maintenant directement, et le poids de vapeur par coup de piston, et le travail produit par la machine. La constance de cet élément reposait, je l'ai déjà dit, sur l'habileté du chauffeur. Après un certain nombre de jours d'exercice, j'ai toujours obtenu de ce côté des résultats satisfaisants.

Pour les traduire en chiffres, je dirai : 1° qu'en général la pression pouvait être considérée comme invariable pendant les trois quarts de l'expérience ; 2° que pendant le quart restant, les variations en plus ou en moins ne dépassaient pas $0^{at.},2$ sur 3, 4 ou $4^{at.}1/_2$. D'ailleurs ici, j'ai eu soin de répéter au moins quatre fois une même expérience. L'accord entre les nombres trouvés était la

meilleure confirmation de l'exactitude. Entre plusieurs jaugeages de vapeur, faits dans les mêmes conditions, la différence ne s'élevait guère à plus d'un deux-centième. On peut donc regarder comme sensiblement juste la détermination du poids P de vapeur dépensée par coup de piston.

Je me suis assez étendu sur les corrections de tous genres qu'il a fallu faire accessoirement sur le nombre N, pour qu'on puisse en apprécier l'exactitude.

Quant à l'exactitude du nombre final de calories conclu de la dépense de vapeur, et de la température de cette vapeur, elle repose toute entière, à fort peu près, sur la validité de la formule empirique donnée par M. Regnault, comme expression du calorique latent de la vapeur, et aussi de la justesse du nombre 0,475, qu'il assigne comme expression invariable du calorique spécifique de la vapeur d'eau. Ici je n'ai aucune réflexion à faire. Il suffit d'avoir suivi attentivement la description des expériences de M. Regnault, pour être convaincu que l'on dispose d'un élément certain en partant de la loi empirique dont nous parlons.

Si je me suis étendu longuement, et peut-être trop longuement, sur la marche de mes expériences, si j'ai cherché par fois même à exagérer les nombres représentant les erreurs possibles dans lesquelles j'ai pu tomber, c'est à cause de l'importance même des conséquences qui découlent de l'anomalie apparente des nombres obtenus, et c'est pour pouvoir développer plus tard ces conséquences, sans avoir à parler de nouveau des chances d'erreurs expérimentales. — J'ai réuni en un seul tableau D tout l'ensemble de mes expériences ; j'y ai consigné des nombres et des éléments qui ne touchent pas directement à la question de l'équivalent mécanique, pensant qu'ils présenteraient néanmoins un certain intérêt.

CHAPITRE IV.

RELATION QUI EXISTE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE DONT L'HOMME EST CAPABLE ET LE CALORIQUE QUI SE DÉVELOPPE DANS SON CORPS.

Sans assimiler le moins du monde les êtres vivants à de simples machines organisées comme le veulent les matérialistes, il est impossible cependant de se ranger complètement de l'avis de quelques dynamistes trop absolus, qui pensent que le corps humain, par exemple, est régi par des lois qui n'ont plus rien de commun avec les lois du monde physique. — Le corps des êtres vivants ne crée rien de ce qui le constitue : il prend tous ses éléments dans le milieu ambiant, et tout en leur imprimant des directions et des mouvements particuliers, il ne peut les dépouiller si entièrement de leurs propriétés naturelles, qu'ils deviennent des éléments nouveaux. A la vérité, telle combinaison que le chimiste opère dans son laboratoire se décompose, au contraire, quand la vie s'en empare ; tel poison que le toxicologiste précipite dans son verre à pied et croit rendre inoffensif, échappe au précieux réactif dans le corps animé, reste poison, et se trouve encore accru dans sa force par le prétendu contrepoison qui, contrairement à la doctrine préconçue, agit alors comme puissance dynamique. — Mais il n'en demeure pas moins vrai que le corps vivant est un assemblage de combinaisons chimiques, un milieu où s'opèrent des réactions chimiques de tout genre, où se dégagent du calorique, de la lumière, de l'électricité. — Il fait une chimie *sui generis*, cela est vrai : mais cette chimie n'est différente de l'autre que dans ses manifestations, et non dans

son essence même, non dans la force d'ont elle se sert pour arranger les éléments pondérables. — Elle ne peut en aucune façon violer les lois générales de l'équilibre : la combinaison qui, dans notre laboratoire, produit tant et tant de calorique, peut ne pas s'opérer dans notre corps : mais si elle s'y opère, elle produira la même somme de calorique, ni plus ni moins.

Sans partir d'aucune idée préconçue sur la nature des principes impondérables, sans admettre aucun système sur leurs manifestations, ni sur le mouvement des corps, on pouvait donc se demander si le corps humain, venant par le fait de notre volonté à agir comme un véritable moteur, ne se comporte pas, par hasard, comme certains de nos moteurs où la force motrice est due à l'action d'un principe impondérable, du calorique, de l'électricité, etc., etc. Et si la somme de calorique, par exemple, que produisent dans notre corps les réactions chimiques, n'est pas autre lorsque nous sommes en repos que lorsque nous travaillons, lorsque nous levons des fardeaux, surmontons des frottements, tirons la matière du repos, ou l'y faisons rentrer.

Telle est la question que je me suis posée, et que j'ai cherché à résoudre de mon mieux.

Il est peu de problèmes qui aient plus exercé la sagacité des philosophes d'abord, et puis ensuite des physiologistes, que la recherche des sources de calorique dans le corps de tous les êtres vivants, et particulièrement dans celui des animaux dits à sang chaud. Comme il en est arrivé dans nos sciences physiques en général, toutes les théories ont été posées, toutes les hypothèses ont été épuisées, bien avant qu'un seul fait vînt à les justifier ou à les refuter. Il est assez difficile à un physicien de nos jours d'émettre un aperçu nouveau sur une question, sans qu'un zélé compulsateur des textes antiques ne vienne bientôt lui prouver que son idée est de bien vieille date. Ce qui a lieu en général devient encore plus frappant pour tout ce qui concerne l'étude des êtres vivants et de l'homme en particulier. On essayerait vainement, par exemple, de dire quelque chose de neuf sur le phénomène de la calorification. La doctrine moderne de la respiration et de la circulation se trouve en germe déjà dans les

écrits de plus d'un penseur des premiers âges. Cette considération, soit dit en passant, serait bien décourageante pour l'expérimentateur patient devenu ainsi un *simple vérificateur*, si à côté du fait vérifié on ne laissait équitablement tous les faits réfutés, si à côté de l'hypothèse tirée de son néant, on ne laissait toutes celles qui doivent y rentrer. — Les philosophes expérimentateurs qui de nos jours ont si laborieusement étudié de près les causes de la chaleur animale, pourraient être déçus d'avoir été devancés de trois mille ans par les philosophes spéculateurs, si à côté de leurs heureux rivaux, on ne plaçait tous ceux qui se sont trompés ; si en parallèle avec ceux qui découvrirent le mystère de la respiration, on ne mettait l'un des plus grands génies de l'antiquité, qui voyait dans la respiration une source de froid indispensable à l'être vivant, autrement consumé rapidement par la seule puissance calorifique de la vie.

Pour peu que nous nous tenions en dehors du domaine de la spéculation seule, nous pouvons dire que les premiers travaux sérieux et concluants sur les causes de la chaleur animale remontent à la fin du siècle dernier. Lavoisier et Laplace avaient fait une longue suite de recherches sur les quantités de calorique que développe la combustion de divers corps simples dans l'oxigène. L'analyse des produits de la respiration leur avait fait penser que cet acte pourrait bien, dans ses conséquences, être assimilé à une sorte de combustion qui s'opérerait, sinon dans les poumons mêmes, du moins à la faveur de la puissance aspirante et absorbante des vaisseaux pulmonaires. Ils appliquèrent leur calorimètre à la mesure de la quantité totale de chaleur développée chez plusieurs espèces d'animaux, et après avoir analysé l'air aspiré et expiré, ils reconnurent que l'oxigène, en se combinant avec l'hydrogène et le carbone du corps pour produire de l'eau et de l'acide carbonique, serait capable, à très-peu près, de produire la somme de calorique trouvée. Les expériences de ces deux hommes éminents furent reprises et confirmées par Dulong, dont les procédés ont toujours porté le cachet de la dernière exactitude.

Je dis que l'oxigène, absorbé et supposé combiné avec le carbone et l'hydrogène, était capable de produire *à peu près* la quantité de calorique indiquée par le calorimètre. Il y avait en effet toujours

un certain *manque* qui a porté plusieurs physiologistes éminents à penser qu'il pourrait bien y avoir dans le phénomène de l'innervation, par exemple, une cause accessoire de calorification, et sans adopter l'idée d'Aristote que la vie par elle-même est une source de chaleur, ils admettent pourtant que les seuls combinaisons chimiques ne suffisent pas pour développer la somme totale de chaleur de l'être vivant. — Toutefois, les expériences faites depuis cette époque par MM. Favre et Silbermann ont montré qu'on avait estimé trop bas la quantité de calorique que produit la combustion de l'hydrogène. En introduisant dans les résultats expérimentaux de Laplace et Lavoisier le nouveau nombre convenable, il se trouve que la somme de chaleur produite par l'animal est parfaitement représentée par les quantités d'oxigène qui servent à la combustion de l'hydrogène et du carbone, et les partisants de l'innervation n'eurent plus de motifs plausibles pour maintenir leur hypothèse première.

Disons-le cependant, il s'en faut beaucoup que la respiration puisse être, comme on l'a pensé, la seule et unique cause de chaleur dans le corps des animaux. La digestion, les mille et mille décompositions qui s'opèrent sans cesse dans l'organisme, sont aussi capables de produire de la chaleur et doivent nécessairement en produire ; d'autres phénomènes de réactions chimiques peuvent produire au contraire du froid, ou faire disparaître du calorique. — On a admis que le carbone et l'hydrogène sont brûlés tels quels ; il ne peut en être ainsi pourtant : ces éléments sont introduits dans le corps à l'état de combinaison, et souvent déjà brûlés en partie ; ils ne peuvent produire toute la chaleur qu'on leur assigne. M. Regnault, en développant toutes ces considérations avec sa sagacité ordinaire, a montré que l'étude de la production de la chaleur animale est plus compliquée qu'on ne l'avait cru, et que tout en admettant que cette chaleur est due en entier aux réactions chimiques, il nous faudra encore beaucoup de temps pour démêler complètement toutes ces actions, et pour assigner à chacune sa valeur propre.

Telle est la dernière forme sous laquelle le problème de la calorification des êtres vivants s'offrait à moi, lorsque j'eus l'idée de

chercher si le travail que nous sommes capables d'exécuter, lorsque par le fait de la volonté nous devenons des *Moteurs*, ne pourrait pas donner lieu à la disparition d'une certaine somme de calorique dans l'être organisé.

J'avais lieu d'être très-peu rassuré sur les difficultés contre lesquelles j'aurai à me heurter, en songeant surtout que par suite de la comparaison que je voulais faire des effets de l'état de repos et de l'état de mouvement, j'allais compliquer plus encore une question déjà complexe en elle-même. Cependant quelques réflexions très-simples me firent pressentir qu'il n'y avait pas lieu de se laisser effrayer par trop, et que ce qui semblait si compliqué pourrait fort bien être, au fond, très-abordable.

Incontestablement il se passe dans notre corps, comme dans celui de tous les vertébrés, une foule de phénomènes capables de développer du calorique, et l'acte respiratoire ne saurait être la seule source de ce principe si essentiel à la vie organique. — Mais il s'agit de savoir si en réalité les effets calorifiques de cet acte ne sont pas tellement considérables que les autres puissent de fait être regardés comme de simples perturbations accessoires. — S'il en était autrement, il n'y aurait plus aucune expérience fructueuse à tenter sur le développement de la chaleur dans l'animal en repos et en mouvement; car nous aurions beau mesurer la somme de chaleur produite par lui que, ne connaissant pas quelle doit être cette somme, ne pouvant mesurer tous les phénomènes qui la produisent, nous ne saurions dire si elle éprouve un déchet ou un accroissement, par suite du travail mécanique exécuté par l'être vivant. Si au contraire l'acte respiratoire est beaucoup plus important dans ses effets que tous les autres phénomènes réunis, l'expérience a pour nous toute chance de devenir fructueuse, car nous pourrons doser les éléments consommés pendant cet acte, et par conséquent assigner leur valeur précise dans la calorification. Or, il ne peut y avoir aucun doute sur la réponse que doit recevoir cette question préliminaire. L'animal à sang chaud, par suite de la perfection relative même de son organisation, est aussi un être plus délicat, plus sensitif, plus exigeant que tous les autres êtres organisés; il souffre, il est exposé à périr dès que des causes externes

tendent à diminuer ou à augmenter d'une manière trop sensible la somme de calorique qu'il représente à chaque instant. Et cependant cet animal vit d'une vie des plus actives, des plus variables; il se trouve à tout moment exposé à des causes qui tendent à diminuer ou à augmenter cette somme, absolument comme elles le font pour les corps inertes. Mais la nature n'a pas été pour ces êtres une mère dure et imprévoyante; ils ont en eux un principe de résistance tel, que tandis qu'un corps inerte s'échauffe ou se refroidit rapidement selon l'état thermal du milieu ambiant, eux au contraire gardent à un centième de degré leur température.

Nous essayerons de montrer à la fin de ce travail par quels moyens admirables de simplicité la nature a atteint ce but : constatons simplement le fait pour le moment, et concluons. L'animal étant obligé de posséder toujours à peu près la même somme de chaleur, pour ne pas souffrir, et se trouvant cependant à tous instants exposé à des transitions qui tendent à modifier très-fortement cette somme, il faut que l'une ou l'autre des sources de calorique qu'il renferme soit douée d'une activité variable et d'une puissance régulatrice tout à fait prédominante.

Mais le calorique produit par cette source ne peut varier qu'à la condition que la fonction qui lui donne naissance varie elle-même en intensité, sans qu'il en résulte un état de souffrance et de maladie même passagère dans l'être vivant. Les phénomènes chimiques qui s'opèrent dans les divers organes, les sécrétions de tous genres n'ont évidemment pas ce caractère de flexibilité.

L'un des actes les plus importants pour le maintien de la vie, la digestion stomachale, par exemple, ne saurait être ni arrêtée ni hâtée trop fort sans qu'il n'en résulte des désordres graves dans l'organisme : la chaleur qui s'y développe suit la marche de la fonction elle-même, et ne peut par suite varier selon les besoins calorifiques qu'éprouve l'animal. L'ensemble de l'appareil respiratoire et circulatoire est le seul qui possède réellement le caractère de flexibilité dont nous parlons. Pour peu que nous nous examinions nous-mêmes, nous sommes frappés de la mobilité des fonctions qu'il accomplit.

Un mouvement musculaire, une passion qui agite notre pensée, un sentiment fugitif qui la traverse, font battre le cœur plus vite ou plus lentement, nous font respirer plus ou moins vite, plus ou moins profondément.

Et pour peu que l'une de ces causes se prolonge, nous sentons une modification manifeste dans notre état thermal. Nous prenons chaud ou froid pour nous servir de l'expression vulgaire, mais caractéristique. En un mot et en résumé, le seul fait de l'existence de l'animal dans l'intégrité de ses fonctions, implique la prédominance presque exclusive de l'acte respiratoire comme source de calorique. Si nous partons de ces considérations dont la justesse n'est guère contestable, on arrive à une autre déduction tout aussi manifeste.

La puissance régulatrice dont est doué l'appareil respiratoire comme source de calorique, démontre la permanence et la fixité de la mesure du phénomène qui s'y accomplit. En d'autres termes beaucoup plus clairs et précis maintenant, si l'oxigène appelé avec l'air dans les poumons et enlevé par eux à cet air, produisait des quantités de calorique *variables*, et dépendant du mode de nutrition, de l'état de santé, de l'état de pensée de vivant, celui-ci serait encore exposé à des lésions profondes dans son organisme.

Il pourrait arriver fréquemment, par exemple, qu'en dépit du redoublement d'énergie de l'acte respiratoire, le calorique vint à manquer dans les moments où il serait le plus nécessaire.

J'étais donc autorisé, d'après l'observation générale de ce qui se passe dans l'organisme des animaux à sang chaud, à admettre que si, chez un même individu placé à peu près dans les mêmes conditions générales, on divise la somme de calorique qu'il développe en un temps donné par la quantité d'oxigène qu'il absorbe dans le même temps, on aurait un quotient à très-peu près constant. La question ainsi simplifiée se réduisait alors à savoir si le quotient serait le même pour l'individu en repos que pour l'individu en état de travail, en fonctionnement comme moteur, comme source de force.

L'hypothèse subsidiaire qui seule rendait abordable la solution

de cette question, n'avait *à priori* rien de trop hasardé : on verra bientôt jusqu'à quel point l'expérience l'a justifiée.

Le succès de la recherche reposait, on le voit, sur une triple expérience : 1° une expérience calorimétrique ; 2° l'analyse de l'air inspiré et expiré ; 3° la mesure dynamométrique du travail produit, lorsque l'individu fonctionne comme moteur.

D'après la description détaillée que je vais donner de la méthode d'expérimentation que j'ai employée, on concevra aisément que l'homme était le seul vertébré qui pût être soumis à l'expérience : il fallait en effet chez l'individu étudié une certaine intelligence, et une assez grande habileté, pour qu'on pût réussir ; il fallait en outre chez lui la bonne volonté et la conscience nécessaires même chez celui qui ne doit concourir que d'une manière passive à la recherche de la vérité. Or, on conçoit aussi que dans cette classe de vertébrés j'ai dû être circonspect sur le choix des sujets étudiés.

Dans une chambre dont la température pouvait être tenue assez constante, j'ai établi une espèce de chambrette en fortes planches de sapin parfaitement jointes et mastiquées. Cette guérite, qui avait la forme indiquée par les fig. 1 et 2 pl. III, était d'une capacité d'environ $2^{m^3},30$; une personne pouvait très-commodément s'y tenir assise ou debout, soit sur la banquette, soit sur la petite traverse, de manière à être toujours à plus de $0^m,5$ du sol inférieur. Elle portait sur ses deux parois latérales des fenêtres en verre très-épais ; en *pp* se trouvait une porte suffisamment grande pour l'entrée, et qui, pour chaque opération, était rendue hermétique à l'aide de bandes de papier que l'on collait sur les fentes. Tout l'ensemble de la chambrette avait été rendu hermétique à l'aide de bandes de papier aussi collées sur les joints intérieurement et extérieurement ; une herméticité absolue n'était d'ailleurs pas nécessaire. En R se trouvait placée une roue à palettes, ou un véritable escalier mobile dont l'axe reposait d'une part sur un coussinet interne, et d'autre part sortait de la paroi verticale de la chambrette, à travers une ouverture très-juste pratiquée dans celle-ci ; cette partie était rendue très-hermétique à l'aide d'une feuille très-épaisse de caoutchouc que traversait à frottement l'axe, et qui était fortement comprimée

contre la paroi à l'aide d'une plaque circulaire en tôle vissée sur la planche. La partie libre externe de l'axe était en rapport avec un moteur éloigné qui donnait à la roue un mouvement continu et régulier de rotation dans le sens de la flèche *ff*, en sorte que la personne soumise à l'expérience, lorsqu'elle voulait se maintenir sur l'extrémité du diamètre horizontal de cette roue, était obligée de marcher avec une vitesse ascendante, égale et contraire à celle de la roue : elle élevait ainsi constamment son propre poids avec la vitesse circonférencielle de la roue, et soulevait sa propre charge à une hauteur connue en un temps donné sans changer réellement de place. La roue était munie d'un compteur qui en indiquait le nombre de tours, et faisait par suite connaître le nombre de pas et le chemin virtuellement parcouru. La chambrette étant hermétique, la personne qui s'y trouvait n'eût pas tardé à en vicier l'air, et à le rendre asphyxiant si l'on n'eût eu soin de l'alimenter sans cesse avec de l'air pur. Il fallait d'ailleurs isoler les produits de l'inspiration et de l'expiration afin de les analyser. Voici la disposition très-simple à l'aide de laquelle j'ai atteint le but. La personne expérimentée tenait à la bouche un tube en caoutchouc dont l'extrémité communiquait avec un gazomètre; dans les narines elle introduisait deux petits bouts de tubes également en caoutchouc fixés sur un tube en ferblanc bifurqué, dont l'extrémité simple portait un autre tuyau de caoutchouc en rapport avec un gazomètre parfaitement égal au premier en section. Elle avait soin d'aspirer l'air par le nez, et de l'expulser par la bouche, et agissait ainsi entre les deux gazomètres comme une véritable pompe aspirante et foulante. Le gazomètre mis en rapport avec le nez était rempli d'air au commencement et se vidait ainsi à travers les poumons dans le second, qui, d'abord vide, se remplissait de l'air qui avait servi à la respiration. En raison de l'élasticité de la matière employée, la personne mise ainsi en rapport avec les deux gazomètres rendait aisément très-hermétique la double communication qui se prêtait à tous ses mouvements et ne gênait aucunément l'action respiratoire : il fallait ici seulement un peu d'habitude et d'adresse pour que les gazomètres ne fussent réellement en rapport qu'avec les poumons seuls. La bonne volonté et le désir de bien faire étaient en quelque sorte les deux seules conditions indispensables à l'opération. Le tube en caoutchouc qui

amenait l'air du gazomètre d'aspiration, que je désignerai à l'avenir par A, était lié à un tube coudé de la forme indiquée *ttt*, solidement fixé et luté en *t'* à la paroi de la chambrette. Un thermomètre divisé en $^1/_{10}$ de degré, et gravé sur verre, était placé dans la partie verticale de ce tube de ferblanc. On avait ainsi la température exacte de l'air à son entrée dans la chambrette. Le tube qui conduisait l'air expiré à l'autre gazomètre (que je désignerai par E) était lié aussi sur un tube de ferblanc de la forme indiquée *sss* : l'air des poumons amené en *s'* par le tube tenu dans la bouche de l'opérateur déposait dans la partie verticale *sf* son eau entraînée qui se déposait dans la fiole *f*, puis donnait sa température au thermomètre placé dans la partie horizontale du tube de ferblanc sortant de la chambrette. — Vers le milieu de la partie supérieure de la chambrette, et en face des fenêtres, était suspendu un thermomètre dont on pouvait lire les divisions du dehors, et qui indiquait à $^1/_{10}$ de degré près la température de l'intérieur. La roue à palettes ou escalier mouvant faisait, dans la partie inférieure de la guérite, tourner vivement un petit ventilateur à quatre ailes, qui mettait en mouvement et mêlait ainsi sans cesse les parties inégalement chaudes de l'air, et maintenait la température à bien peu près uniforme partout.

Voici maintenant comment étaient conduites les expériences :

La personne que l'on voulait étudier était pesée à un gramme près à l'aide de l'hydrostat [1] ; elle entrait immédiatement dans la guérite dont on fermait hermétiquement la porte, comme il a été dit et elle se tenait tranquille ; on commençait de suite à marcher sur la roue, selon le cas, ayant soin de ne s'appuyer en aucun point des parois, et de bien se tenir au milieu de la guérite. On attendait alors que le thermomètre interne, qui d'abord montait rapidement, fût devenu à peu près stationnaire, puis elle commençait à respirer à l'aide des tuyaux de caoutchouc : les deux gazo-

[1] Cette balance remarquable, inventée par R. Kæppelin, professeur de sciences physiques au Lycée impérial de Colmar (Haut-Rhin), est une généralisation ingénieuse de la balance de Trall. Je crois inutile de donner ici sa description que l'on trouvera dans le Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse. (Bulletin N° 134 p. 129).

mètres étaient munis à leur partie supérieure d'orifices assez larges que l'on pouvait fermer instantanément à l'aide d'une *fermeture hydraulique* ; de sorte que l'air appelé et expulsé par les poumons circulait librement, sans déterminer le mouvement des gazomètres. Lorsque le thermomètre du tuyau de sortie de l'air était devenu stable, on abaissait la cloche E jusqu'à un repère constant; on abaissait de même la cloche A pour en mouiller les parois, puis on l'élevait jusqu'à un repère constant. A ce même moment on fermait les chapeaux des deux fermetures hydrauliques, et l'on comptait à l'aide d'une montre à secondes la durée de la course des deux cloches. On laissait monter E d'une quantité constante, et l'on mesurait chaque fois la course descendante de A. Les plateaux attachés à l'extrémité libre des cordes de suspension des gazomètres étaient lestés de manière à ce que la personne soumise à l'expérience n'éprouvât aucune gêne dans la respiration par suite d'une contre-pression trop forte. L'état de pression interne des gazomètres était d'ailleurs constaté à l'aide de manomètres à siphon pleins d'eau, et cet état était tenu constant à l'aide de poids additionnels qu'on ajoutait, ou qu'on enlevait des plateaux pendant la marche.

On repesait la personne aussitôt qu'elle sortait de la chambrette, et puis on procédait à l'analyse de l'air recueilli dans le gazomètre E.

Je vais maintenant scinder, en ses trois parties essentielles, l'ensemble de l'expérience, et indiquer les détails nécessaires pour pouvoir se servir avec fruit de ses éléments.

1° Détermination du calorique produit.

L'air de la chambrette qui ne se renouvelait aucunément puisque les parois étaient presqu'absolument hermétiques, et que les poumons étaient alimentés directement, cet air, dis-je, s'échauffait jusqu'à ce que les pertes de calorique éprouvées par les parois fussent précisément égales à celles qu'éprouvait la personne renfermée dans le calorimètre : il fallait attendre assez longtemps pour que tout l'appareil arrivât à ce régime stable, avant de songer à relever aucun nombre. Ce régime stable absolument nécessaire, comme on conçoit, était généralement long à obtenir : j'ai utile-

ment abrégé la durée de ces préliminaires, en plaçant dans la chambrette un grand vase de ferblanc plein d'eau bouillante et fermé; on le retirait lestement pour y substituer la personne essayée, dès que le thermomètre interne cessait de monter. A l'aide de cet artifice très-simple, je gagnais près d'une heure de temps : il fallait néanmoins presque toujours une bonne demi-heure avant que l'on pût admettre l'indication maxima du thermomètre interne.

Supposons maintenant connu, pour chaque cas, l'excès de température de la chambrette sur celle de la chambre qu'on relevait en même temps. Comment pouvons-nous tirer parti de cet élément pour calculer les pertes de calorique de la chambrette, et par suite leurs égales, les pertes de l'individu par la périphérie externe de son corps? Voici comment j'y suis parvenu d'une façon que je n'appelerai pas exacte, mais qui, tout au moins, doit être très-approximative.

Dans la chambrette j'allumai un bec à gaz alimenté avec de l'hydrogène pur dont j'avais rempli l'un de mes gazomètres. La porte de la chambrette fut fermée hermétiquement, et la roue ainsi que l'agitateur à ailes furent mis en mouvement absolument comme pour une expérience proprement dite. La pression du gazomètre étant tenue parfaitement constante, je notai la durée de l'écoulement et puis les points de départ et d'arrêt de la cloche. L'expérience, cela va sans dire, fut prolongée jusqu'à ce que le thermomètre interne cessât de monter. La même opération fut répétée et variée en augmentant la pression du gaz, de manière à aller jusqu'à doubler à peu près le débit de notre bec. Comme la chambrette contenait au moins quatre fois plus d'oxigène qu'il n'en fallait pour brûler l'hydrogène consommé pendant la durée de la plus longue expérience, on peut admettre qu'en général la combustion était complète et que le gaz dégageait par gramme le nombre de $34^{cal.},463$ indiqué dans ces derniers temps par MM. Favre et Silbermann [1].

[1] Voyez au sujet de ce nombre les expériences relatées dans le chapitre VIII.

Le tableau suivant donne les chiffres de ces expériences.

	N° 1.	N° 2.	N° 3.	N° 4.	N° 5.
Hauteur barométrique =....	0^{m},737	0^{m},737	0^{m},737	0^{m},739	0^{m},740
Température du gaz saturé d'eau	9°	9°	9°	9°,4	9°.
Tension de la vapeur à 9°....	0^{m},009	0^{m},009	0^{m},009	0^{m},010	0^{m},009
Pression supportée par le gaz hydrogène B—*b*..........	0^{m},728	0^{m},728	0^{m},728	0^{m},729	0^{m},731
Durée des expériences.......	60^{m}.	60^{m}.	70^{m}.	90^{m}.	78^{m}.
Volume du gaz brûlé	0^{m3},0229	0^{m3},1131	0^{m3},0408	0^{m3},1508	0^{m3},0521
Idem par heure............	0^{m3},0229	0^{m3},0969	0^{m3},0350	0^{m3},1005	0^{m3},0401
Supposé sec et ramené de 9° et de B—*b* à 0° et 0^{m},76.....	0^{m3},0212	0^{m3},0897	0^{m3},0324	0^{m3},0932	0^{m3},0373
Poids du gaz brûlé..........	1^{gr},906	8^{gr},066	2^{gr},914	8^{gr},369	3^{gr}.,349
Chaleur produite par heure ..	65^{ca},684	277^{ca},97	100^{ca},42	289^{ca},04	115^{ca},91
Quotient du nombre de calories divisé par l'excès T—*t*	25,75	26,22	25,74	25,57	25,75
Température de la chambrette.	11°,05	19°,3	12°,8	20°,7	13°,5
Température de la chambre..	8°,5	8°,7	8°,9	9°,4	9°.

Ces expériences que j'extrais d'un grand nombre d'autres à peu près analogues nous montrent : 1° que les pertes de calorique de notre chambrette croissent très-sensiblement en proportion de l'excès de la température interne sur la température externe ; 2° que la *raison* de notre accroissement doit être très-près de 25,75, puisqu'elle ne dépasse ce nombre que pour un seul cas que je cite ici. C'est ce nombre 25,75 que j'ai d'ailleurs trouvé en prenant la moyenne de 12 expériences où les dépenses de gaz ont été très-variées, et où, pour plusieurs cas, l'excès de T sur *t* était encore beaucoup plus considérable que pour le nombre le plus fort que j'indique. J'ai notamment aussi employé trois espèces de becs de gaz, très-différentes, pensant que la combustion peut être

plus ou moins complète selon l'orifice par lequel se fait l'écoulement. Je n'ai pas aperçu, en somme, des écarts plus grands que ceux que donnait un même bec avec des dépenses variées. Avec les données de ces expériences rien n'est plus facile que de déterminer le nombre de calories que la personne enfermée dans le calorimètre cédait continuellement à l'air interne pour le tenir à une température stable, supérieure à celle de l'air ambiant. Il suffit pour cela de multiplier par notre nombre 25,75 le nombre de degrés dont la température interne dépasse la température externe. — Car le calorique émis par cette personne, absolument comme celui de notre bec à gaz, ne fait que compenser celui que perdent à chaque instant les parois de la chambrette. Et cette compensation est évidemment rigoureuse dès que l'appareil est arrivé à un régime stable.

Mais une réflexion critique très-naturelle se présente ici à l'esprit : notre bec à gaz, dont la chaleur nous a servi à connaître les pertes éprouvées par l'appareil dans tel ou tel cas, remplace-t-il réellement la personne sur laquelle on veut expérimenter? En d'autres termes plus précis, les pertes de notre chambrette sont-elles les mêmes lorsque le calorique qui y fait équilibre, est fourni par un corps d'une très-grande étendue qui rayonne inégalement vers les parois, ou par une flamme d'une étendue relativement très-petite? Cette question très-importante m'a préoccupé dès l'abord, et il m'était essentiel de m'assurer de sa validité. — Voici ce qui m'a semblé devoir faire regarder cette question critique comme nulle.

Lorsque l'agitateur placé au bas de la chambrette fonctionnait, il y avait égalité presque parfaite entre la température de l'air dans tous les points du calorimètre ; et la position de la personne soumise à l'essai n'avait nulle influence sur la température accusée par le thermomètre interne. Qu'on se tint assis ou debout, en arrière ou en avant, courbé ou droit, l'excès de température restait invariable, pourvu que les autres conditions fussent les mêmes. Lorsque je me suis soumis d'abord moi-même à l'expérience, j'ai comparé l'état du thermomètre pour plusieurs cas très-différents : ainsi tantôt à l'action de l'agitateur j'ai ajouté celle d'un petit soufflet, à l'aide duquel je dirigeais l'air interne dans tous les sens ; tantôt j'agitais

l'air avec un grand éventail. Il ne m'a jamais été possible de remarquer des différences notables dans l'indication du thermomètre suspendu dans la chambrette. Je pense donc pouvoir conclure que les conditions thermales de mon appareil devaient être très-peu modifiées par la substitution d'une source calorifique à une autre, puisque cet état ne variait pas lorsque cependant la personne renfermée se plaçait dans des conditions évidemment très-différentes entre elles. — Si je me suis étendu sur cette discussion critique préliminaire, c'est parce que le calorique émis par la périphérie de notre corps forme la portion la plus notable de celui que nous produisons à chaque moment, et qu'une erreur dans mon évaluation porterait une grave atteinte à l'ensemble de l'expérience qui nous occupe.

Les poumons perdent du calorique de deux manières. — Ils échauffent l'air qui alternativement y pénètre, et ensuite ils vaporisent une certaine quantité d'eau. Par la disposition de mon appareil, je ne mesurais pas séparément *tout le calorique* ainsi émis : l'air émis par les poumons traversait en effet un assez long tube avant de parvenir au thermomètre, placé exactement à la sortie de la chambrette. Cet air cédait une partie de son calorique à l'air de la chambrette, et cette partie était évaluée indirectement, puisqu'elle contribuait à élever la température interne. Nous n'avons donc à nous occuper que de ce qui se passe à l'entrée et à la sortie du calorimètre. L'air qui est aspiré arrive saturé de vapeur à la température i; celui qui est expulsé sort à la température f, et saturé aussi. Il emporte donc : 1° tout le calorique qu'il a fallu pour l'élever de i à f; 2° tout le calorique qu'il a fallu pour évaporer l'excès d'eau des deux saturations à f et à i. Désignons par C, le calorique spécifique de l'air expulsé, par P, le poids de cet air dépouillé de l'excès de vapeur qui s'y ajoute en route ; par Π cet excès ; par Q le nombre de calories que nous cherchons.

Nous avons :

$$Q = CP(f - i) + \Pi\,(606{,}5 + 0{,}305\, f - f.)$$

pour expression de ce nombre de calories.

Trois éléments essentiels sont à déterminer ici : Π, P et C.

Dans mes expériences, la température du gaz reçu dans le gazomètre E était précisément la même que celle de l'air aspiré, dans le gazomètre A, et égale à i. Désignons donc par v, le volume du gaz expulsé en une heure par exemple ; par B, la pression du baromètre ; par b, la tension de la vapeur d'eau à la température i ; par b', la tension à la température f. Puisque dans un mélange de gaz et de vapeur les pressions s'ajoutent, nous avons $B-b$, pour expression de la pression que supporte l'air expulsé et recueilli en E.

Le volume de cet air ramené à 0 et à $0^{m},76$ serait donc :

$$V=v\left(\frac{B-b}{0,76}\right)\frac{1}{1+0,00375\,i}.$$

Mais ce gaz, au sortir du calorimètre était saturé à la température f, la pression qu'il supportait alors était donc $B-b'$, et son volume était :

$$V=\left(v\left(\frac{B-b}{0,76}\right)\frac{1}{1+0,00375\,i}\right)\left(\frac{0,76}{B-b'}\right)(1+0,00375\,f)$$

$$=v\left(\frac{B-b}{B-b'}\right)\left(\frac{1+0,00375\,f}{1+0,00375\,f}\right)$$

Les tableaux hygrométriques nous donnent le poids de vapeur qui est contenu dans un mètre cube de gaz saturé à diverses températures. En cherchant donc dans ces tables, les poids qui répondent à i et f, les multipliant par v et V' et prenant la différence, nous aurons la valeur de Π.

2° L'analyse chimique nous ayant fait connaître la composition de l'air expulsé, il nous est facile de calculer P et C, ou ce qui revient au même, le poids d'eau que représente chacun des gaz formant la totalité du volume V. Soit en effet α, β et γ les proportions en volumes d'azote, d'oxigène et d'acide carbonique contenu dans un volume d'air E, soit c, c', c'' les capacités calorifiques de ces gaz, Π' le poids de vapeur d'eau contenu primitivement dans l'air, c''' la capacité calorifique de cette vapeur, nous aurons :

$$PC=V(\alpha c\,\Delta+\beta c'\,\Delta'+\gamma c''\,\Delta'')+\Pi' c''',$$

Δ, Δ', Δ'' étant le poids du mètre cube de ces gaz,

Nous avons ces chiffres :

$$P\,C = (\alpha\,0{,}2734.\ 1{,}2675 + \beta\,0{,}2361.\ 1{,}432 + \gamma\,0{,}221.\ 1{,}981) + 0{,}45\,\pi'.$$

C'est avec ces formules qu'ont été calculés les nombres des colonnes de mon petit tableau. On voit que, jusqu'à un certain point, l'exactitude de ces nombres repose sur la précision de l'analyse du gaz de la cloche E. Je dis jusqu'à un certain point ; les capacités du gaz azote, oxigène et acide carbonique, leurs pesanteurs spécifiques mêmes, ne diffèrent pas assez entre elles pour qu'une erreur de calcul, dans les proportions du mélange, puisse modifier sensiblement la somme P C de leurs poids multipliés par leur capacité.

Mais cette analyse chimique sur laquelle je vais maintenant m'étendre, a un autre côté bien plus important.

2° Analyse des produits de la respiration.

En raison des masses relativement très-grandes de gaz que respire une personne, même en repos, il était impossible d'opérer autrement qu'avec des gazomètres fonctionnant dans de l'eau. D'un autre côté, n'ayant pas de cuve à mercure assez spacieuse, j'ai été obligé de faire toutes mes analyses sur la cuve à eau ordinaire. Ces deux circonstances, je le sais, préviendront bien des personnes contre l'exactitude de mes résultats.

Il est impossible, en effet, d'opérer avec rigueur l'analyse des gaz autrement que sur la cuve à mercure. Cependant si au terme de rigueur nous substituons celui d'approximation, si de plus on admet que dans l'emploi d'une méthode expérimentale à la vérité imparfaite, j'ai employé toutes les précautions nécessaires pour obvier à une partie de l'imperfection, on ne m'accusera pas de prétendre à l'impossible en présentant mes résultats comme suffisamment corrects, et comme en rapport en tous cas avec l'ensemble des résultats d'une expérimentation, aux difficultés de laquelle on n'échappera jamais entièrement. Je vais donc indiquer en détail mes procédés de jaugeage et d'analyse, afin que chacun puisse juger de leur

validité, et même apporter dans mes nombres les corrections ultérieures dont ils pourraient être susceptibles.

Les gaz sont tous plus ou moins solubles dans l'eau. Tantôt ce liquide en abandonne un, en partie du moins, pour en prendre un autre qui lui est offert, et qui est plus soluble, tantôt en s'emparant d'un gaz il devient, au contraire, plus capable d'en prendre un autre différent. — La première idée qui se présente à l'esprit, c'est que les gaz de la respiration, recueillis dans notre gazomètre E, doivent être modifiés dans leur composition par l'eau de la citerne du gazomètre. Cependant je puis dire ici déjà qu'en raison de la construction du gazomètre, cette altération ne pouvait avoir lieu que très-lentement : le tuyau d'amener de l'air s'élevait en effet au milieu de la citerne jusqu'au-dessus du niveau de la nappe d'eau, de sorte que le gaz, au lieu de barboter en arrivant, pénétrait au sein même de l'espace qui lui était offert, et que le liquide restait parfaitement tranquille à sa surface pendant l'ascension de la cloche. J'ai dès le principe analysé l'air immédiatement, et puis après vingt-quatre heures de séjour dans la cloche, il ne m'a pas été possible de constater la moindre diminution d'acide carbonique, par exemple. Et comme je n'ai jamais, pour les expériences proprement dites, attendu plus d'une heure avant de procéder à l'analyse, je crois avoir été à l'abri de toute erreur de ce côté. — Les gaz que l'on *manipule* sur la cuve à eau peuvent être bien plus vite modifiés que dans les cas précédents, puisqu'il y a ici mouvement et renouvellement rapide de toutes les parties en contact. Il est donc essentiel de savoir éviter autant que possible la manipulation. Dans mes recherches je disposais de grands volumes d'air ; je pouvais donc en perdre autant qu'il me convenait pour bien opérér, et je pouvais éviter de recueillir, à proprement parler, mes gaz sur l'eau même de la cuve.

Pour doser l'acide carbonique, j'avais un ballon de 10$^{lit.}$,378 à col très-étroit marqué d'un trait à la partie qui répondait au volume indiqué. Dans ce flacon sec, et plein d'air ordinaire, je faisais pénétrer jusqu'au bas un tube amenant les gaz de mon gazomètre. L'air de ce dernier se substituait ainsi peu à peu à celui du flacon : lorsqu'il avait passé environ 10 à 15 fois en volume ce que conte-

nait le ballon, je retirais très-lentement le tube sans cesser de faire affluer le gaz; puis, je versais rapidement, en faisant couler le long du verre un volume connu de lessive caustique dans le ballon que je bouchais immédiatement. Le gaz battu pendant quelque temps avec le liquide abandonnait tout son acide carbonique. Le ballon étant alors ouvert, le col plongé dans l'eau, celle-ci rentrait en volume précisément égal à celui de l'acide carbonique; mais au lieu de mesurer ce volume, ce qui eût été un moyen en apparence très-simple de doser l'acide carbonique, je faisais au contraire rentrer dans le ballon de l'air en volume connu, jusqu'à ce que le ballon fût aussi rempli que primitivement. Le volume d'air ainsi introduit était évidemment égal à celui de l'acide carbonique.

Pour le dosage de l'oxigène et de l'azote, je ne pouvais pas opérer aussi complètement en dehors du contact de l'eau de la cuve. L'air expiré, recueilli comme précédemment, et battu avec de la soude, était rapidement mêlé dans une cloche avec de l'hydrogène récemment préparé et conservé dans des flacons tout pleins de gaz, à mince goulot, bouchés et plongés dans l'eau. Le mélange se faisait invariablement dans le rapport en volume de 2 d'hydrogène et 5 d'air (je savais par des essais préalables que l'oxigène était toujours au-dessous de 19 p. 0/0 en volume dans cet air). Le mélange était introduit dans un grand eudiomètre en cuivre, à col mince, de la capacité de 0^{lit}, 881. Je remplissais toujours l'eudiomètre à plein bord; pour cela je commençais par y comprimer légèrement l'air en l'introduisant sous une certaine pression d'eau, puis l'instrument était tenu bien verticalement et relevé très-lentement jusqu'à ce que le col ne plongeât plus que de 0^m,001, et qu'ainsi tout le gaz en excès en fût ressorti. Je le replongeais alors à une certaine profondeur sous l'eau, et j'y vissais un bouchon hermétique en métal. Après la détonation, l'eudiomètre était rouvert dans de l'eau *bouillie*, et le gaz qu'il contenait était transvasé dans un long tube en verre renversé sur la cuve. Le tube étant alors plongé jusqu'à ce que le niveau intérieur de l'eau répondit parfaitement à celui de la cuve, j'abaissais jusqu'à ce point une douille en métal qui serrait doucement le tube, et à l'aide de laquelle il m'était facile de viser très-exactement pour obtenir le lieu de la nappe d'eau. Le tube

était alors retiré de la cuve, rempli d'eau jusqu'au repère, et pesé. Le poids du tube vide était connu à l'avance : à l'aide de cette pesée je connaissais le poids d'eau contenu dans le tube, et par suite le volume d'eau égal à celui du gaz qui restait après la Combustion.

Je n'ai pas même mentionné jusqu'ici les trois corrections essentielles que nécessite tout jaugeage de gaz : celles qui concernent la pression, la température et l'état hygrométrique. C'est parce que, à l'aide d'une précaution très-simple à laquelle je me suis invariablement astreint, j'ai pu me borner à une seule correction finale qui n'avait aucune incertitude.

1° Par suite de la méthode d'affleurement dont j'ai parlé plus haut, le gaz jaugé était toujours à la même pression B que l'air externe, pression relevée à l'aide du baromètre.

2° Les gaz étaient toujours *saturés* de vapeur d'eau puisqu'ils arrivaient d'un gazomètre à eau, puisqu'ils étaient jaugés sur l'eau, et puis qu'enfin, comme nous allons voir, leur température était toujours celle de cette eau.

3° Reste donc la seule question de température : au lieu d'attendre, comme il faut le faire sur la cuve à mercure, que les gaz et la cuve aient pris la température de l'air ambiant, je ne me préoccupais pas de cette dernière, et je ne relevais que celle de la cuve. Je ramenais mes gaz en quelque sorte forcément à cette température, soit en arrosant sans cesse les flacons avec l'eau de la cuve même, soit en les y plongeant, et ne cessant que pour l'instant très-court, nécessaire pour l'observation des volumes; observation répetée d'abord *grosso modo*, puis de plus en plus attentivement, jusqu'à ce qu'il me devint impossible de constater une différence d'une répétition à une autre.

A l'aide de cet artifice dans le dosage des volumes, il est clair que toute correction relative à l'état de saturation devient inutile, pourvu que *la température de la cuve ne change pas pendant le cours d'une même opération.* Or c'est ce qu'il est facile d'obtenir

en s'exerçant à manipuler un peu lestement sur une cuve contenant près de 200 litres d'eau.

Il m'a semblé suffisant de présenter en un seul tableau les résultats définitifs de mes analyses, en donnant tous les éléments qui ont servi aux calculs; en admettant en effet que j'aie commis une faute dans une mesure, ou dans une observation, tous les détails que je pourrais donner ici ne serviraient plus à rectifier l'erreur commise à mon insu. Quant aux calculs eux-mêmes, concernant par exemple les corrections des températures etc. etc., l'essentiel était d'en indiquer les éléments composants, et non de les répéter dans ce memoire. Cependant comme exemple, et pour bien préciser ma manière d'opérer, je crois devoir donner la marche d'une de mes expériences au moins.

Je prends celle du n° 8 comme type.

Le ballon de 10^{l},378 dont j'ai parlé étant plongé dans la cuve, son goulot en l'air, et au-dessus du niveau de l'eau, l'air en est expulsé par celui qui afflue du gazomètre E. L'air expiré ayant à peu près déjà de la sorte la température de la cuve, on retourne le ballon en fermant d'abord le goulot.

On plonge celui-ci sous l'eau, et à l'aide d'un peu d'air E recueilli de la même façon dans un autre vase, on complète ce qui peut manquer par suite d'un refroidissement encore plus considérable. Le ballon étant soulevé doucement, on applique la main sur le goulot, on retourne et on introduit très-rapidement 0^{lit}, 0895 de lessive caustique, on rebouche, on agite pendant un temps suffisant, on rouvre sous l'eau, on referme et l'on agite encore. Tout l'acide carbonique étant absorbé, on plonge de force le ballon dans l'eau pour le remettre à sa température, on le soulève doucement et on y introduit de l'air, en volume connu 0$^{l.}$,5865, pour le remplir de nouveau comme primitivement. La lessive ayant expulsé du ballon son propre volume d'air, il s'en suit que 10^{lit}, 378 — 0^{lit},0895 contiennent 0^{lit}, 497 d'acide carbonique en volume ou 0,497 : 10,2885 = 0,0483. Ni pression, ni température, ni saturation n'ayant varié pendant cette opération, toute correction est inutile ici, et il s'en suit

bue notre chiffre convient aussi bien à l'air E ramené, comme nous verrons bientôt, à 0° et $0^{m.},76$ qu'à celui sur lequel nous avons opéré. L'expérience eudiométrique est en son genre aussi simple que la précédente. L'eudiomètre ayant été rempli, à la température de la cuve et à la pression externe, d'un mélange en volume de 2 d'hydrogène et de 5 d'air E dépouillé de son acide carbonique, on transvase le gaz restant après la détonation par l'étincelle électrique dans le tube dont j'ai parlé. Le tube étant constamment arrosé à grands flots avec l'eau de la cuve, l'air y est à la température de celle-ci.

Le volume d'eau par lequel il faut le remplacer pour revenir au repère fixé au point d'affleurement, pesait $560^{gr.}$ et est par suite de $0^{lit.},56$.

A la température de 4 ou 5°, où j'ai opéré, j'ai pu me dispenser de toute correction pour la dilatation de cette eau elle-même. Nos $0^{lit.},881$ sont encore $^{2}/_{7}$. $0^{lit.},881 = 0^{lit.},126 . 2 = 0^{lit.},252$ d'hydrogène et $^{5}/_{7}$. $0^{lit.},881 = 0^{lit.},629$ d'air E. Ce volume s'étant réduit à $0^{lit.},56$, il en a disparu $0^{lit.},881 - 0^{lit.},560 = 0^{lit.},321$ formé de $^{1}/_{3}$ en volume d'oxigène et de $^{2}/_{3}$ d'hydrogène ou $0^{lit.},107$ du premier gaz et $0^{lit.},214$ du second. Mais nous avions $0^{lit.},252$ de ce dernier, il en reste donc encore $0^{lit.},038$ mêlés avec l'azote, dont le volume est $0^{lit.},56 - 0^{lit.},038 = 0^{lit.},522$. Notre volume renferme donc $\frac{0^{lit.},5220}{629} = 0,83$ d'azote, et $\frac{107^{lit.}}{629} = 0^{lit.},17$ d'oxigène.

L'opération ayant été conduite assez rapidement pour qu'il n'y eût que peu de variation barométrique, et de plus la température des gaz étant aussi la même d'un bout à l'autre, nous n'avons encore nulle correction à faire sur ces rapports de volume.

Soient donc maintenant B la pression barométrique, *i* la température de l'air E dans le gazomètre, *p* la tension de la vapeur d'eau à la température *i*, et W le volume expiré par heure à la température *i*, ce volume à 0°, et à $0^{m.},76$ sera $W\left(\frac{B-b}{0,76}\right)\frac{1}{1+0,00375\,i}$; ce qui, en prenant les éléments de notre expérience, nous donne :

$$1,780\left(\frac{0,747-0,007}{0,76}\right)\frac{1}{1+0,00375.4^{o},7} = 1701^{lit.}$$

Ces 1701$^{lit.}$ contiennent 82$^{lit.}$, 1 d'acide carbonique, 1343$^{lit.}$ d'azote et 275$^{lit.}$ d'oxigène, et la densité des gaz étant 1,98; 1,268; 1,432, on a pour leurs poids respectifs, 162$^{gr.}$,6, 1703$^{gr.}$, 393$^{gr.}$,8.

Je crois avoir assez dit sur mes méthodes analytiques, et sur les calculs que j'y ai appliqués, pour rendre aisé l'examen critique général de mes résultats. Je vais donc passer à l'indication de la méthode dynamométrique que j'ai employée pour mesurer le travail exécuté par la personne soumise à l'expérience.

3° Mesure du travail produit par l'homme.

Parmi les différentes manières dont l'homme peut agir comme moteur, la plus naturelle évidemment, celle qu'il exerce en quelque sorte à tout moment, c'est la marche ascendante pendant laquelle il élève en définitive son propre poids à une certaine hauteur. Lorsque nous marchons sur un plan horizontal, nous élevons notre poids d'une hauteur égale à peu près au *Sinus-verse* de l'arc que décrit la jambe, et le corps retombe à chaque pas de cette même hauteur par son propre poids. Je dis à peu près, car le fait varie d'une personne à une autre, avec la démarche particulière à chacune, et il serait impossible de réduire en chiffres le travail ainsi opéré. Il n'en est plus de même de la marche ascendante sur une échelle, ou sur un escalier par exemple. Ici l'individu dépense une force motrice dont la valeur intégrale est évidemment celle du produit du poids par l'espace parcouru en ligne verticale en un temps quelconque pris pour unité. Mais en réalité il est parfaitement indifférent que la marche ascendante s'opère effectivement, ou qu'elle soit seulement en quelque sorte simulée, parce que l'escalier dont nous parlons sera disposé de manière à fuir sans cesse avec une vitesse précisément égale à celle qu'aurait la marche ascendante sur un escalier fixe. — La mesure dynamométrique du travail produit sera encore ici le chemin parcouru par l'échelle, multiplié par le poids de la personne en mouvement. Ce chemin est alors l'espace virtuellement parcouru par celle-ci. Ainsi, la personne qui sans cesse grimpait sur la roue placée dans notre chambrette, travaillait de fait bien réellement : et si, au lieu de faire mouvoir la roue par un moteur, on y eût appliqué un frein ou

tout autre dynamomètre de telle sorte, qu'à l'aide d'une résistance continue, on l'eût maintenu à la vitesse que lui aurait alors communiquée la personne, ce frein eût mesuré directement le travail du moteur humain, et nous l'aurait donné sous la forme P H du produit d'un poids par une hauteur parcourue en un temps connu. — Ce que je viens de dire suffit pour faire saisir le principe qui est très-clair par lui-même. En désignant par N le nombre de tours de notre roue, par P le poids de la personne agissant comme moteur, nous avons PN.0^{m}·,18. 18 = T pour le travail exécuté (18 étant le nombre de marches de la roue, et 0^{m}·,18 étant leur écartement). — Je ne m'arrêterai donc que sur la partie de la discussion critique que l'on peut faire de la réalisation du principe.

En effet : 1° il suffit de voir le tracé de notre roue pour comprendre que la marche ascendante n'était pas du tout la même si la personne, au lieu de marcher en *a*, ou sur l'extrémité du diamètre horizontal, s'élevait au-dessus de cette ligne ; ses pas alors se raccourcissaient en hauteur, et le travail exécuté diminuait en proportion sans que l'on pût avoir la mesure précise de cette diminution. Il était donc bien essentiel que l'opérateur eût soin de se tenir aussi près que possible des limites *c* et *a''* en plus et en moins ; 2° pour marcher sur cette roue il fallait, quelqu'adroit que l'on fût, se tenir à la traverse : selon la manière de se tenir, il y avait addition ou soustraction de la poussée du pied sur les marches. Cependant ici encore on pouvait aisément parvenir à une position d'équilibre stable, tel que la perte ou l'accroissement de poids devient insignifiant.

Me trouvant en face de difficultés prévues, on conçoit que j'ai fait tout mon possible pour les surmonter. J'ai donc commencé par opérer sur moi-même, et à plusieurs reprises, afin de bien me rendre compte de la manière dont il convenait de marcher, et de pouvoir ensuite guider les personnes qui ont eu la complaisance de se prêter à mes expériences. J'ai promptement reconnu qu'il en était ici comme dans les autres expériences gymnastiques où l'on réussit en général d'autant moins qu'on se roidit plus, et que par suite on dépense le plus d'efforts inutilement. Les deux ou trois

premières fois que je voulus marcher et respirer à la fois par mes deux tubes en caoutchouc, je fus si promptement exténué que je craignis de ne pouvoir prolonger assez l'expérience pour atteindre la température stable dans la chambrette, ou même pour parvenir à ce qu'on nomme un régime constant : condition en dehors de laquelle aucune expérience de physique ne saurait devenir exacte et concluante. Cependant je remarquai bientôt qu'il importait seulement de savoir se mettre à l'aise, de faire le moins d'efforts possible, de chercher en un mot à marcher et à respirer naturellement, et au bout de peu de répétitions, je supportais, sans la moindre fatigue, une ascension d'une durée plus que suffisante pour voir mon thermomètre rester parfaitement immobile. Je pus donc ainsi donner aux autres opérateurs les indications nécessaires pour éviter aisément ce qui eût été un obstacle aux succès d'une expérience, et je réussis assez complètement pour deux d'entre eux.

D'après tout ce qui vient d'être dit, on voit que nous disposons maintenant de tous les éléments essentiels à notre problème.

En considérant *à priori* la respiration comme la principale source de calorique de notre corps, nous devons regarder comme *criterium* de la justesse de ce point de départ l'observation d'un rapport constant entre le calorique produit par l'individu, et l'oxigène absorbé par lui. Si ce rapport manquait, notre point de départ serait faux, et ses conséquences ne pourraient être que fausses aussi.

Nous connaissons la quantité de calorique que dégage un homme en un temps donné, et ce temps, expérimentalement parlant, est assez grand pour que nous puissions affirmer que la quantité de calorique dégagé est bien celle qui s'est développée dans le corps pendant ce temps, et non celle qui pourrait y avoir été emmagasinée antérieurement.

Nous connaissons la quantité d'oxigène absorbée pendant un temps suffisamment long aussi, pour que nous n'ayons pas à craindre l'intervention de phénomènes accidentels et passagers. En divisant le poids de l'oxigène absorbé par le nombre de calories

développées dans le même temps, nous obtenons donc un quotient que j'ai consigné sur mon tableau sous le nom d'équivalent calorifique de l'oxigène. Ce nombre est sensiblement le même pour les différents individus placés dans les mêmes conditions. Il varie au contraire sur le même individu selon que celui-ci est en repos ou travaille.

Nous avons donc deux quotients; j'ai consigné l'un sous le nom d'équivalent à l'état de repos, et l'autre sous le nom d'équivalent à l'état de mouvement. Si nous multiplions le premier par la quantité d'oxigène qu'un homme absorbe lorsqu'il travaille, nous obtenons, non ce que cet homme a produit réellement, mais ce qu'il eût produit si l'état de mouvement n'avait apporté aucune modification dans le jeu de la source calorifique. J'ai nommé cette quantité fictive nombre de calories disponibles. En en retranchant ce qui s'est réellement développé de calorique, nous avons évidemment le nombre de calories que le travail a fait produire de moins, ou si l'on veut (et pour parler en dehors de tout système préconçu) ce que le travail a empêché d'apparaître comme chaleur. Enfin, si nous divisons la quantité de travail exécuté, et exprimée à l'aide d'unités convenables, par le nombre de calories manquant, nous aurons un rapport qui nous exprimera combien il faut de travail pour empêcher l'apparition d'une unité de calorique. Ce quotient est ce que l'on est convenu maintenant d'appeler équivalent mécanique de la chaleur. Ainsi énoncé, ce quotient répond à celui que nous avons trouvé dans l'étude des frottements, de la désagrégation des corps, et de l'expansion de la vapeur d'eau.

Je n'ai discuté ni la valeur, ni la nature, ni le sens des conséquences des quatre quotients que nous avons trouvés. Je n'ai pas fait la moindre allusion aux conséquences métaphysiques qu'on peut en tirer.

Les trois premiers termes vont faire l'objet du résumé suivant. Le dernier fera l'objet de conclusions métaphysiques qui se rattachent naturellement à tout travail qui repose sur l'étude de l'équilibre des forces de la nature.

CHAPITRE V.

RÉSUMÉ GÉNÉRAL DES QUATRE SÉRIES D'EXPÉRIENCES PRÉCÉDENTES.

Nous avons cherché dans quatre ordres de phénomènes différents les relations qui existent entre le travail mécanique produit ou consommé, et le calorique absorbé ou développé pendant ces phénomènes. Pour tous les quatre cas, nous avons trouvé des rapports numériques évidents entre ces deux éléments si distincts.

Mais ces rapports, loin d'être égaux entre eux, diffèrent non-seulement d'un ordre de phénomènes à l'autre, mais varient dans le même ordre de phénomènes lorsque ceux-ci peuvent se classer en sous-genres, et ne sont pas parfaitement semblables.

Il s'agit maintenant de nouveau de savoir si les chiffres auxquels ont conduit mes expériences ont un caractère d'exactitude suffisant pour légitimer les conclusions précédentes. C'est ce que je vais examiner à un point de vue critique en posant comme point de départ les deux questions suivantes. L'équivalent mécanique de la chaleur varie-t-il réellement d'un genre de phénomène à un autre? Quelle est la valeur de cet équivalent pour un genre déterminé?

1° Mes expériences sur les frottements médiats ont été faites à l'aide d'un même appareil, il est vrai, mais par des méthodes contradictoires si opposées que les sources d'erreur de l'une devaient forcément disparaître dans l'autre, et y faire place à des causes d'erreur différentes. En un mot, il ne peut point avoir régné dans les trois méthodes employées une même cause de trouble assez

énergique pour faire converger en un seul sens les moyennes obtenues [1].

Ces trois méthodes conduisent à une conclusion commune.

Quelles que soient les pressions, les vitesses, les températures et les qualités des matières lubrifiantes interposées, les relations qui existent entre le calorique dévoloppé et le travail consommé par un frottement médiat semblent pouvoir s'exprimer par un nombre constant $371^{k.m.}, 6$, ou du moins, pour parler avec plus de réserve : si ce nombre n'est pas absolument indépendant des éléments précédents, ses variations sont tellement limitées qu'elles se noient dans les variations dues aux erreurs inévitables de l'expérimentation, pour deux cas absolument semblables en apparence. Je dis que notre rapport commun est $371^{k.m.}, 6$. Ce nombre en effet est tiré de plus de 30 observations dont les écarts en plus et en moins ne sont que peu étendus, et autorisent parfaitement à regarder comme très-approximative une moyenne générale.

L'équivalent mécanique pour les cas des frottements médiats est donc à fort peu près constant s'il ne l'est absolument, et égal à $371^{k.m.}, 6$.

2° Les expériences concernant la désagrégation des corps à l'aide d'un foret n'ont point été faites à un point de vue contradictoire ; le chiffre $425^{k.m.}$ auquel elles ont conduit pourrait donc très-légitimement être soupçonné d'inexactitude.

La principale objection qu'on puisse faire à cette espèce d'expérience est qu'il est impossible de forer une pièce de métal dur, sans qu'il ne se produise des vibrations sonores assez intenses. Or ces vibrations, par le fait même que nous les percevons, se transmettent et se dispersent dans la matière du milieu ambiant (air, sol, supports en bois et en fer etc. etc.). Tout le travail mesuré n'est donc pas dépensé à l'opération seule du forage, et dès lors le chiffre réel de l'équivalent mécanique est $(F - f) : q$, F étant le travail

(1) Voyez les trois tableaux numériques A, B et C.

total, f celui dépensé en vibration, q la quantité de calorique recueillie.

Cette objection est d'une justesse incontestable. Nous ne pouvons donc qu'en peser en quelque sorte les conséquences, afin de voir si elles suffisent pour expliquer un accroissement de 371$^{k.m.}$, 6 à 425$^{k.m.}$ dans l'équivalent.

Je n'ai parlé dans la partie précédente que des résultats que donne l'étude des frottements médiats, de ceux où les deux surfaces en mouvement relatif sont séparées par un troisième corps intermédiaire. Les frottements immédiats sont pourtant tout aussi importants à scruter au point de vue calorifique.

Dans le premier genre, contrairement à ce que l'on admet assez généralement, la résistance, l'effort moteur est dépendant des surfaces et des vitesses.

Pour se convaincre du dernier fait, il suffit de parcourir les expériences consignées sur mon tableau; on y verra que, toutes choses égales d'ailleurs, une même charge du plateau de la balance ne répond jamais à deux vitesses différentes. D'après une longue suite de recherches que j'ai faites, la valeur du frottement médiat pour une même température peut s'exprimer approximativement par une formule empirique telle que $F = A\,(P\,S\,V)^{\gamma}$., où A désigne un coéfficient dépendant de la nature des trois corps en contact, P la pression, S la surface, V la vitesse de glissement, et γ un exposant qui dans la pratique peut être remplacé sans trop d'erreur par 1/2, d'où il résulte $F = A\sqrt{P\,S\,V}$.

Pour les frottements immédiats, au contraire, j'ai trouvé comme cela est généralement admis, $F = A\,P$, c'est-à-dire que l'effort est proportionnel aux pressions, et indépendant des surfaces et des vitesses.

Je n'indique ces diverses circonstances qu'en passant, afin de faire sentir seulement combien il est essentiel de séparer ces deux genres de frottements, et combien il devait m'importer d'étudier aussi les frottements immédiats au point de vue calorifique. C'est

aussi ce que j'ai cherché à faire de tous mes efforts. Mais je dois avouer que les difficultés que présente cette étude m'ont, si non fait échouer, du moins empêché d'arriver à des résultats assez réguliers pour être dignes de confiance, et pour être rangés à côté de ceux que j'ai obtenus avec les frottements médiats. Je me permets cependant ici de mentionner quelques cas de mes recherches les moins incorrectes, parce que le frottement immédiat m'a semblé établir une espèce de transition naturelle entre le frottement médiat où les corps frottants peuvent à la rigueur ne pas s'user, et le forage d'un corps solide où la désagrégation est le fait dominant. Ce qui rendait les expériences sur le frottement immédiat si difficile à l'aide de la balance, c'était l'inégalité excessive de la résistance. L'incertitude de l'expérience portait sur la pesée uniquement : mais comme c'est là un élément essentiel, on conçoit tous les inconvénients qu'entrainait cette inégalité. En prenant des soins et des précaustions extraordinaires, je suis parvenu deux ou trois fois à faire marcher mon appareil pendant une bonne demi-heure à un régime assez stable pour pouvoir peser à 1/20 près au moins. C'est à l'aide de la première méthode (page 8) que je déterminais la quantité de calorique développée.

Il m'est arrivé plusieurs fois d'employer des graisses impures contenant du plâtre; par exemple, ou d'autres poudres, qui y avaient été ajoutées frauduleusement. Et dans ces cas l'équivalent s'élevait toujours au-dessus de $371^{k.m.}$, 6. Je dois mentionner même un fait qui, dès le principe, m'a beaucoup gêné dans mes recherches. Lorsque la balance de frottement était tenue à l'aide du filet d'eau froide à une température assez basse (8 ou 10°), l'huile (si pure qu'elle fût) qui servait à graisser semblait avoir besoin d'être triturée un certain temps avant de donner un nombre constant pour le frottement, et chaque fois qu'on regraissait, le frottement au lieu de baisser augmentait, et dans de telles conditions l'équivalent mécanique obtenu haussait toujours en grandeur, il convergeait vers $400^{k.m.}$ au moins. Ainsi, par exemple, plusieurs fois j'ai opéré en abaissant la température des pièces frottantes de 5° au-dessous de la température ambiante et en laissant marcher jusqu'à ce que la température des pièces frottantes dépassât de 5° cette dernière ;

connaissant exactement le poids d'eau que représentait l'appareil, je pouvais calculer ensuite le nombre de calories produit par un travail estimé en même temps. A travers toutes les inégalités inhérentes à la pesée en pareil cas, l'accroissement de l'équivalent était manifeste.

On remarquera maintenant que l'objection capitale, faite avec raison à l'expérience du forage, ne peut plus s'appliquer à tous les cas que je viens d'examiner. Lorsque la balance était graissée avec de l'huile franche, il n'y avait certainement aucune vibration sonore de produite. Et si de telles vibrations avaient lieu pour le frottement immédiat, elles ne pouvaient du moins pas être perçues, tandis que le foret qui se fraie une route dans un métal cassant rend toujours un son très-intense; la balance marchant à sec n'en donnait, pour ainsi dire, aucun.

Il se pourrait que d'autres causes d'erreurs vinssent à agir dans les différents cas que j'ai mentionnés. Ce ne pourrait être cependant qu'en vertu d'un hasard assez singulier que ces diverses causes concourraient ainsi à un même effet, celui de faire converger l'équivalent mécanique vers un même nombre très-différent de celui que donne le frottement médiat lorsque les corps frottants sont arrivés à un régime stable. Il me semble plus naturel d'admettre que le travail que l'on dépense à modifier d'une manière définitive la disposition des molécules des corps, en surmontant leur attraction réciproque, ait produit des quantités de calorique légèrement inférieures à celle que développe le travail dépensé en simple glissement de deux surfaces en regard.

Ce n'est toutefois qu'avec réserve que je hasarde ici une opinion.

Les difficultés de l'expérimentation régulière sur les frottements immédiats et la désagrégation, l'usure des corps, s'opposeront peut-être longtemps encore à ce que l'on produise autre chose que des opinions hasardées. Mais ce qui me paraît du moins découler positivement de mes essais, c'est que l'équivalent mécanique diffère réellement selon qu'il s'agit du simple glissement de deux corps séparés par un intermédiaire qui empêche leur altération, ou de l'usure résul-

tant des parties frottantes. L'équivalent est plus faible pour le premier cas que pour le second, et ce n'est pas à des causes perturbatrices de l'expérience qu'il est possible d'attribuer la différence.

3° Les expériences concernant la vapeur d'eau ont eu en tous points un caractère de contrôle réciproque, c'est-à-dire qu'elles ont été faites sur des appareils, et dans des conditions si variées qu'il est impossible d'attribuer à une cause perturbatrice constante la différence très-considérable qui existe entre l'équivalent auquel elles conduisent, et le nombre 371$^{k.m.}$,6 qui concerne les frottements médiats. J'ai exposé avec détail toutes les chances d'erreur de mes recherches ; je les ai même exagérées à dessein. Mais, quoi qu'on fasse, on ne sera jamais autorisé à doubler mes nombres, même à les tripler, pour en assimiler l'équivalent mécanique donné par la vapeur à celui que donnent les frottements.

Les nombres de la colonne XXVI, de mon tableau des expériences faites sur la vapeur, ne suivent aucune loi évidente (1). — Bien plus, les anomalies les plus étranges y règnent *du moins en apparence*. Les essais ont été faits sur des appareils de physique gigantesques, sur des pompes à vapeur de systèmes très-différents. Avec l'une de ces machines nous voyons la vapeur surchauffée donner un équivalent plus fort que la vapeur saturée. Avec l'autre machine c'est précisément l'inverse qui a lieu. — Toutes ces bizarreries, toutes ces anomalies cependant, si elles ne s'expliquent pas à l'avance, du moins se conçoivent *à posteriori*, si l'on ne s'obstine pas à vouloir faire de l'équivalent mécanique un seul et unique nombre constant; ce qui semblait être dû aux vices d'une expérimentation incorrecte, découle très-naturellement du mode particulier en vertu duquel s'exercent les fonctions de la vapeur dans la machine, et il existe en ce sens des différences caractéristiques entre chaque espèce de machine. Je ne signalerai que la différence radicale manifeste qui existe entre la machine Woolf, à enveloppe de vapeur, et la machine à un cylindre sans enveloppe.

(1) Voyez le tableau D.

Dans la machine à un cylindre, tout le calorique propre à la vapeur passe avec elle dans l'intérieur du cylindre pendant la détente; il faut donc que cette vapeur se suffise en quelque sorte à elle-même, c'est-à-dire qu'elle agisse en vertu du seul calorique qu'elle représentait primitivement. Si elle est simplement à l'état saturé, son calorique ne suffit pas pour la tenir à l'état de gaz, et elle se condense partiellement; si elle est à l'état surchauffé, elle peut au contraire se détendre sans se condenser. — Dans la machine Woolf au contraire, la vapeur interne des cylindres se trouve, par les parois métalliques très-conductrices de ceux-ci, sans cesse en rapport avec le calorique de la vapeur de l'enveloppe. — Dès que la détente commence, la vapeur, par le fait de l'abaissement de température qui en est la conséquence, peut enlever du calorique à la vapeur de l'enveloppe. En effet, lorsque la machine Woolf travaille avec vapeur saturée, le calorique ainsi enlevé par la vapeur interne qui se détend, enlève assez de calorique à la vapeur de l'enveloppe pour demeurer complètement à l'état de gaz, et c'est par cette raison qu'une machine à deux cylindres donne 20 p. °/₀ de force de plus à dépense égale de vapeur, lorsqu'elle fonctionne avec enveloppe, que lorsque la vapeur entre directement aux cylindres.

La condensation qui dans la machine à un cylindre se fait intérieurement, se fait donc dans l'enveloppe même pour l'autre machine; car la vapeur ne saurait perdre de son calorique sans se réduire partiellement en eau. — Si au contraire la machine Woolf travaille avec vapeur surchauffée, il n'y a plus de condensation ni dans l'intérieur des cylindres, ni dans l'enveloppe; mais cela n'empêche pas qu'entre la vapeur très-chaude de cette enveloppe et la vapeur interne refroidie par l'expansion, il n'y ait un échange continu et énergique de calorique. La vapeur de l'enveloppe passant toute entière dans le cylindre, Il en résulte qu'elle reçoit en entier tout le calorique qu'elle avait perdu en premier lieu. Elle arrive à 250°, par exemple, dans l'enveloppe; en entrant dans le petit cylindre elle n'est plus qu'à 200°, parce que la vapeur interne qui se détend lui a pris de son calorique: mais comme c'est en somme la même vapeur qui agit, il s'ensuit qu'elle reprend pendant

la détente le calorique qui portait la vapeur de l'enveloppe de 200° à 250°.

Ce que je viens d'exposer sont des faits expérimentaux que chacun peut aisément vérifier, et non de simples inductions théoriques qui pourraient être justes au fond, mais exagérées dans leurs conséquences. Et ces faits sont, de plus, importants et riches en conséquences. Confrontés avec les chiffres de la colonne XXVI de mon tableau, ils nous font comprendre que ce que dans les irrégularités de ces chiffres nous prenions d'abord pour des anomalies ou des défauts graves de l'expérience, pourrait être très-naturel, et se trouver être la suite forcée des lois qui régissent la vapeur.—Les résultats d'une telle confrontation peuvent se traduire, ou plutôt se résumer en quelques propositions assez simples. Mais généralisons de suite davantage. Aucune loi, aucun nombre arrêté ne se laissent apercevoir dans les chiffres des colonnes XXVI et XXVII. Mais la tendance et la signification de ces chiffres sont assez évidentes. Il disparait du calorique pendant la détente de la vapeur. Si, par exemple, on divise le nombre de calories disparues par le poids de la vapeur de manière à rapporter ce calorique à l'unité de poids, on arrive à des nombres variables mais très-élevés. Ainsi, nous voyons (colonne XXVII) que le nombre de calories s'élève quelquefois jusqu'au $^1/_7$ du calorique total que représentait la vapeur. — Si nous divisons le travail dû à la détente par le nombre de calories qu'elle a fait disparaître ; si, en un mot, nous déterminons numériquement l'équivalent mécanique de la chaleur, nous arrivons à des nombres variables entre des limites assez écartées. Il nous est impossible, comme je l'ai dit, d'apercevoir la loi qui régit les variations de cet équivalent et celle des quotients dont j'ai parlé à l'instant, mais ces deux éléments sont visiblement fonctions : 1° des pressions initiales et finales de la vapeur ; 2° de son augmentation de volume ; 3° de son état calorifique primitif ; car ils varient selon que la vapeur est surchauffée, ou simplement saturée au moment de la détente ; 4° enfin de *l'époque* à laquelle la vapeur reçoit du calorique. Et cette quatrième relation, qui est des plus importantes, se rapporte à ce qu'on peut nommer les différences intrinsèques des diverses machines à vapeur. Ainsi, dans la machine à un cylindre sans

enveloppe, la vapeur apporte dans le cylindre tout son calorique ; dans la machine à deux cylindres et à enveloppe, elle reçoit une partie de ce calorique au moment de la détente seulement, et c'est ce qui donne la clef des anomalies apparentes des chiffres de nos colonnes XXVI et XXVII.

En somme, et sans entrer pour le moment dans d'autres détails, si nos expériences ne fixent pas la valeur précise de l'équivalent mécanique pour chaque cas, en raison des incertitudes et des inexactitudes, selon moi, inévitables quelles renferment, du moins démontrent-elles positivement que cet équivalent oscille entre de certaines limites pour les diverses circonstances où la vapeur se détend, mais que surtout sa valeur, même la plus forte, est encore de beaucoup inférieure à celle que nous avons trouvée pour l'équivalent mécanique concernant les frottements.

4° Pour tenter une suite d'expériences ayant pour but de reconnaître si, dans notre corps, il se développe proportionnellement moins de calorique lorsque nous travaillons que lorsque nous sommes en repos, il fallait nécessairement partir d'une hypothèse subsidiaire, à savoir que la respiration est la principale source de calorique dans notre organisme, et que par suite l'oxigène consommé peut servir de mesure à la quantité de chaleur que nous développons en nous.

Cette hypothèse, dont la justesse d'ailleurs était déjà démontrée par les beaux travaux de Lavoisier, Laplace, Dulong et Regnault, était de nature à se vérifier d'elle-même, par les résultats des expériences. — Si chez le même individu, et surtout chez deux individus différents, à l'état de repos, la quantité de calorique dégagée en un certain temps est proportionnelle à la quantité d'oxigène consommée, notre hypothèse sera complètement justifiée.

Dans le fait, il était impossible ici de s'attendre à autre chose qu'à une proportionnalité *approximative :* 1° la respiration, en effet, est la source principale et dominante du calorique, mais elle n'est pas la seule, absolument parlant; or, elle est la seule qu'on puisse directement mesurer ; il s'en suit que notre loi de proportionnalité

doit être troublée; 2° de plus, l'expérimentation dont il s'agit est en elle-même des plus délicates, et suppose nécessairement des *erreurs* qui devront encore troubler notre loi, fût-elle absolument juste. Si nous nous tenons dans les limites fixées par les considérations précédentes, l'inspection de notre tableau numérique ([1]) sera satisfaisante, et nous regarderons la mesure des éléments de la respiration comme la mesure approximative, ou plutôt comme l'expression équivalente du calorique développé. Nous voyons que le nombre de la colonne XXXI, qui a pour titre : Équivalent calorifique de l'oxigène à l'état de repos, varie non-seulement d'une personne à l'autre, mais même sur le même individu. Cette variation cependant se maintient dans des limites tolérables, quant aux conclusions générales auxquelles nous voulons arriver. De quelque manière qu'on exagère les chances d'erreur, je ne pense pas qu'il faille leur attribuer toutes les différences, et il ne me paraît pas douteux que l'équivalent en question ne puisse réellement pas être regardé comme un nombre constant.

Le nombre que j'ai obtenu en opérant sur moi oscille entre 3,21 et 3,477. On voit qu'il est presque identique à celui de l'expérience faite sur un homme du même âge que moi, il est vrai, d'une constitution toute différente; on voit qu'il s'approche aussi de celui qu'a donné l'expérience faite sur une jeune fille. Le nombre 4,8 de l'expérience 12 est le plus écarté des précédents; mais je pense qu'ici l'incertitude doit être, en partie du moins, attribuée à une faute inhérente à l'expérience. Ainsi qu'il est dit, le jeune homme soumis à l'essai souffrait d'un catarrhe chronique; il me paraît donc possible que sa respiration ait été un peu plus accélérée que de coutume pendant le mouvement des gazomètres, en raison de cette condition insolite, et peut-être gênante pour un appareil respiratoire délicat et malade, d'aspirer par le nez et d'expirer par la bouche. Notre hypothèse était vérifiée au moins approximativement par les nombres de la colonne XXXI. Si nous passons aux autres éléments de notre tableau, nous trouvons une autre vérification qui a une utilité double. La seule inspection de la colonne XIII

(1) Voyez le tableau E.

nous montre combien la capacité pulmonaire et la vitesse de respiration varient d'un individu à l'autre; je prends les deux extrêmes : tandis qu'il me fallait 757$^{lit.}$ d'air par heure, à l'état de repos, la jeune fille en respirait 300$^{lit.}$, c'est-à-dire à peine la moitié. Mais en même temps, comme les mêmes besoins de calorique sont là; comme elle produisait en même temps la même somme de calorique, nous voyons la puissance absorbante des poumons varier en sens précisément inverse, et de telle sorte que la quantité en poids désignée, consommée par heure est presque la même de part et d'autre. Je n'ai pas besoin de faire remarquer que ce parallèle est une vérification à la fois de notre première hypothèse, et de l'exactitude de mes analyses.

Si de la colonne de l'équivalent au repos nous passons à celle de l'équivalent à l'état du mouvement, nous sommes frappés des différences énormes des nombres. Mais au point de vue de ces différences, cette colonne ne peut être examinée que parallèlement avec la colonne III; nous voyons que chez deux individus du même poids, le nombre de l'équivalent est presque le même, et qu'il diffère en proportion du poids des expérimentateurs. La raison en est très-simple; le travail exécuté est proportionné au poids et à la vitesse d'ascension virtuelle; or, si le travail consomme dans l'individu une partie de l'élément impondérable fourni par la respiration, il est clair que l'équivalent calorifique de l'oxigène doit varier en raison inverse du travail produit, et c'est en effet ce qui a lieu. La colonne XXXVI nous montre que l'équivalent mécanique de la chaleur est presque le même chez les deux expérimentateurs; on voit par là que les nombres de la colonne XXXI sont et devaient être les plus différents, puisque le travail exécuté par l'un des individus était de 34532$^{k.m.}$, tandis que le travail exécuté par l'autre n'est que de 20750$^{k.m.}$

Si maintenant nous passons à l'équivalent mécanique lui-même : 1° nous voyons qu'il n'est qu'à *peu près* constant chez le même individu. — Cependant ici nous pouvons très-légitimement admettre que les différences doivent s'attribuer tout autant à des erreurs expérimentales qu'à la réalité des faits; 2° nous voyons qu'il diffère

aussi d'un individu à l'autre, mais dans des limites telles qu'on pourrait encore à la rigueur attribuer les variations à des erreurs expérimentales; le nombre le plus élevé est 105k.m., 3, et se rapporte à l'expérience faite sur le jeune homme maladif, dont j'ai indiqué l'affection; 3° enfin, nous avons tout lieu d'être frappés de la différence énorme de l'équivalent mécanique en général, donné par notre colonne XXXVI, et de ceux que nous avons trouvés, pour les frottements médiats et la vapeur. Ce que je disais de ces derniers, s'applique ici *à fortiori*; qu'on exagère comme on le voudra les erreurs inhérentes à mes essais, et l'on ne sera jamais en droit d'augmenter de 1 à 6, et de 1 à 7 les résultats finaux. Il faudrait en effet multiplier par 6 l'équivalent des expériences 1 à 7 pour arriver à notre nombre moyen 371k.m.,6 qui se rapporte aux frottements. De nombreuses critiques, je n'en puis douter, seront faites de ces recherches sur la valeur de l'équivalent mécanique dans les moteurs animés. Il ne m'appartient pas de juger celles qui pourraient concerner l'exactitude des opérations en elles-mêmes; il est toutefois une sorte de garantie morale que je crois pouvoir donner ici, et qui a plus d'importance qu'on ne le croit en général. L'homme le plus consciencieux, lorsqu'il poursuit une idée qu'il a conçue et qu'il aime, est sujet à faillir. Plus d'un expérimentateur peut-être, lorsqu'il rentre en lui-même, trouve à se reprocher, non certes d'avoir faussé des chiffres à dessein, mais seulement d'avoir omis certaines précautions qui contrarieraient les résultats auxquels il visait. — Je ne prétends nullement me poser en exception, et il m'a semblé utile, pour constater s'il se développe moins de calorique *en proportion* chez l'être vivant en mouvement que chez cet être en repos, de me soustraire forcément à toute tentative de flatter certains nombres expérimentaux. Dans cette longue série d'expériences délicates et pénibles, je me suis à dessein refusé la seule satisfaction qui soutienne le courage *du chercheur* : celle d'atteindre le but. J'ai achevé toutes mes expériences avant de faire un seul des calculs qui devaient les débrouiller. L'épreuve la plus essentielle, la détermination du calorique que perdait la chambrette calorimétrique pour tel ou tel excès de température, n'a été faite même qu'en dernier lieu.

Mais s'il m'est interdit de juger la validité des expériences au point de vue opératoire, je puis du moins répondre à une ou deux objections que l'on pourrait faire aux résultas finaux.

Notre équivalent mécanique est beaucoup plus faible que tous ceux que j'ai obtenus moi-même dans d'autres expériences. Autrement dit, chez l'homme en mouvement, la quantité de calorique développé de moins par suite du travail, est beaucoup plus considérable que dans le moteur à vapeur à détente par exemple, et beaucoup plus encore que la quantité de calorique que représente le frottement. On est donc naturellement en droit de se demander si dans mon procédé dynamométrique aucune partie du travail n'a pu échapper. Ne se perd-il pas, par exemple, beaucoup de force motrice par les frottements mêmes des muscles? Et d'un autre côté, tout l'appareil circulatoire dont l'activité s'accroît par suite du travail, ne consomme-t-il pas aussi de la force? Une réponse affirmative ne saurait être éludée ici. Il n'y a pas le moindre doute que le moteur animé ne rend pas plus 100 p. °/₀ qu'aucun de nos moteurs inanimés; il n'y a pas de doute que toute la somme des effets ne se manifesté pas au dehors *en effet utile*. Mais la réponse à l'objection se trouve dans le terme même qu'on est obligé ici d'employer: si tout ne se retrouve pas en dehors, ou si une partie est consommée intérieurement au moteur par suite de frottements, de chocs, d'usure, de modifications chimiques dans les fibres (et l'on sait que ce dernier effet se produit réellement pendant la contraction des muscles), c'est qu'on est certain maintenant que ces frottements, etc., etc. reproduisent la chaleur qu'ils eussent coûté à l'individu, si leur effet avait pu paraître au dehors. En un mot, tout travail perdu à l'intérieur recrée une partie du calorique qu'il avait fait disparaître d'abord. Et si par hasard on disait qu'il se reproduit un peu moins de calorique qu'il n'y en a eu de dépensé (ce qui est possible dans de certaines limites), on s'attaquerait directement au principe même d'un équivalent constant que l'on cherchait à défendre. Je me suis arrêté à dessein à ces objections très-naturelles, parce qu'elles ont été faites par deux médecins très-compétents qui ont bien voulu s'intéresser à mes travaux. En résumé maintenant, si nous jetons un coup d'œil rétrospectif rapide sur les

quatre ordres d'expériences que je viens d'exposer, je pense que l'on en concluera avec moi :

1° Qu'il est impossible d'admettre l'existence d'un seul équivalent mécanique de la chaleur ;

2° Que cet élément nouveau si remarquable introduit dans nos sciences modernes est une variable ;

3° Que la grandeur absolue de l'équivalent dépend de la nature des phénomènes où il se produit ou disparaît de la chaleur ;

4° Qu'il est par conséquent impossible de fixer définitivement la valeur de l'équivalent, mais qu'au contraire, il importe de chercher dans des expériences répétées et bien faites sous toutes les formes, quelle est l'amplitude de la variation dont nous parlons ;

5° Et qu'enfin, en nous tenant dans le cercle de ce qui est connu, l'équivalent de la chaleur humaine est le plus faible possible (de 57 à $102^{k.m.}$) ; qu'il s'élève déjà à $120^{k.m.}$ et à $275^{k.m.}$ pour la vapeur ; que dans les frottements médiats sa valeur assez exacte est de $371^{k.m.},6$; et que c'est enfin pour le cas de l'usure du corps que sa valeur est la plus élevée possible.

Je ne saurais revenir et insister assez sur ce fait. Dans le cours de mes expériences je me suis astreint, autant qu'il m'a été possible, à toutes les plus minimes précautions qui pouvaient me garantir l'exactitude à mes propres yeux. Dans l'exposé que j'ai fait de ces recherches, au contraire, je me suis astreint à exagérer partout ostensiblement les erreurs possibles. Mais allât-on encore beaucoup plus loin que moi en ce sens, on n'arrivera pourtant pas, je pense, à ôter aux conclusions précédentes leur validité.

Dans un même ordre de phénomènes, une loi de proportionnalité évidente lie le calorique produit ou disparu, au travail dépensé ou produit.

Je dis que cette loi est évidente. Elle a le caractère de la plus haute exactitude, en effet, dans les nombres qui concernent les

frottements médiats ; elle conserve encore ce caractère d'approximation très-rapprochée dans les nombres tirés des expériences si difficiles sur la vapeur et sur la chaleur de l'être vivant.

Mais le quotient de la proportion varie positivement d'un ordre de phénomènes à l'autre, et il est impossible de déterminer d'une façon générale et absolue la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur.

CHAPITRE VI.

NOUVELLES RECHERCHES SUR LES QUANTITÉS DE CALORIQUE DÉVELOPPÉES PAR LE FROTTEMENT MÉDIAT.

Lorsque, à l'aide d'un même instrument d'observation, un physicien se livre à une suite d'investigations dans le but d'étudier un ordre donné de phénomènes, il arrive nécessairement un moment où il a épuisé tout ce que peut reveler cet instrument; un moment à partir duquel il ne peut plus que tourner dans le même cercle et parvenir à des résultats semblables, qu'ils soient d'ailleurs exacts, ou seulement approximatifs ou faux. Si alors il n'est pas encore satisfait de la généralité ou de la justesse de ces observations, il ne lui reste d'autre ressource que de modifier profondément ou de changer même entièrement l'instrument qui lui servait.

Tel était précisément le cas où je me trouvais à l'égard de la balance de frottement décrite dans la première partie de ce mémoire. J'en avais tiré à peu près tout ce qu'il était possible et les résultats obtenus, devenus presque invariables, qu'ils fussent inexacts ou exacts, exposaient au même genre de critique juste ou injuste.

Je me voyais donc contraint, pour mieux faire et pour aller plus loin, de recourir à un appareil construit sur d'autres principes, s'il se pouvait. Une autre raison d'ailleurs m'y engageait fortement : j'avais trouvé, qu'à égalité de pression sur les surfaces frottantes, l'équivalent mécanique restait à peu près invariablement de $371^{k.m.},6$ pour toutes les vitesses et avec toutes les sortes de graissage.

En eût-il été de même pour toutes les pressions?

La question méritait une réponse. On verra bientôt qu'elle n'est point affirmative. Mais la balance de frottement ne se prêtait guère à de grands changements de charge.

Voici la description de l'appareil très-différent que j'y ai substitué :

AA (fig. 1 et 2). Arbre horizontal et cylindrique en fer doux, percé de part en part, porté sur des coussinets fixés à de fortes poutres verticales, mu régulièrement avec des vitesses que l'on pouvait varier à volonté à l'aide de poulies opposées à échelons.

TTTT. Tourillon en fonte de $0^{m\cdot},1$ de diamètre, fixé en porte-à-faux à l'extrémité de l'arbre; parfaitement cylindrique et poli, ce tourillon, creux aussi, est fermé sur le devant par une platine percée d'un trou central, portant un tube de $0^{m\cdot},1$ de longueur.

Ce tube s'engage à frottement doux dans la boite à air dont le dessin fait comprendre la construction. Le tube en équerre *ss'* étant tenu immobile pendant que l'arbre tourne, un courant d'eau froide pouvait être dirigé à travers le tourillon et l'axe, et un thermomètre pouvait être introduit sans risque, jusqu'en *a* pour prendre la température de l'eau en ce point.

MM', MM'. Leviers en fer, horizontaux, parallèles, se servant réciproquement de points d'appui par l'intermédiaire du cadre en fer *rrrr*.

A leurs extrémités, également distantes du centre du tourillon, ces leviers portent des plateaux de balance, dont les points de suspension peuvent être élevés ou abaissés, et être ainsi ramenés sur une même ligne droite horizontale passant par le centre.

En raison de cette disposition très-simple, les leviers peuvent être lestés de manière à rester en équilibre parfait autour du centre, tout en appuyant les coussinets CC' CC' sur le tourillon avec une pression qui est exprimée par $P\left(\frac{L+l}{l}\right)$ pour le coussinet supérieur et par $P\left(\frac{L-l}{l}\right)$ pour le coussinet inférieur; P étant les poids d'équilibre suspendus aux extrémités, y compris le poids des leviers eux-mêmes aux points de suspension.

Les bras de levier L étant égaux, il est clair qu'une fois l'équilibre établi, il se maintient pourvu qu'on mette sur les plateaux des poids égaux. Pour obtenir dès le début un équilibre rigoureux, j'ai substitué aux tourillons un cylindre égal BB, muni de deux petits axes cylindriques *nn'* posés sur de fortes règles parallèles et horizontales *pp'*. Tout l'ensemble du système, roulant ainsi aisément sur ces règles, il était facile d'équilibrer les leviers à quelques grammes près.

Lorsque l'arbre tournait (dans le sens *ff'* par exemple), le frottement exercé par le tourillon contre les coussinets tendait à faire tourner les leviers dans le même sens. Pour les tenir à leur position horizontale, il fallait donc lester le plateau ascendant, et ce poids en excès, multiplié par le rapport du rayon du tourillon au bras de levier L, donnait précisément la mesure de l'effort dû au frottement. Cette évaluation était au surplus inutile à l'objet que j'avais à me proposer et qui était de connaître le travail dépensé en frottement. Pour avoir ce travail il suffisait en effet de multiplier le poids additionnel du plateau ascendant par la *vitesse virtuelle* de ce plateau, par la vitesse qu'il eût prise s'il eût été libre de se mouvoir.

Les coussinets C C', C C' étaient percés de part en part en quatre canaux parallèles disposés de telle sorte qu'un courant d'eau entrant par le bout du tube *v* sortait par le bout *v'* après avoir circulé à travers les quatre conduits. Le coussinet supérieur était en outre percé de deux trous verticaux par lesquels on pouvait introduire l'huile ou la graisse destinée à lubrifier les surfaces frottantes.

L'usage de cette balance, quoique très-simple en lui-même, exige les mêmes soins et la même patience que ceux qu'il m'a fallu consacrer à la première balance à frottement.

Un mois de travail de polissage a été nécessaire pour roder les surfaces et obtenir un régime régulier. Et encore était-il nécessaire, à chaque essai, de marcher au moins une demi-heure dans les conditions choisies, avant de commencer l'expérience véritable. D'après l'ensemble des observations que j'ai faites et d'après la pratique que j'ai pu acquérir en ce sens, je crois pouvoir ici me

permettre de dire qu'on devra regarder comme nulle et non avenue toute expérience sur le frottement qui aurait été faite en dehors de ces conditions de durée prolongée.

Voici comment était conduite chaque expérience.

Le tourillon étant mis à sa vitesse voulue et le coussinet C C étant alimenté d'un graissage régulier et continu, on plaçait sur les plateaux de balance la charge avec laquelle on voulait opérer ; puis aussitôt on ouvrait les trois robinets adaptés à un tonneau d'eau froide qui, à l'aide de tubes de caoutchouc, envoyait le liquide aux tuyaux. Les robinets étaient gouvernés par tâtonnement jusqu'à ce que l'eau passant en T, C et C' et sortant par les tubes eût à peu près un même degré de température *voulu* (nous verrons ailleurs pourquoi j'appuie sur ce dernier mot). Lorsque le frottement était devenu régulier ; lorsque, avec un lest constant, les leviers restaient horizontaux, on engrenait un compteur qui indiquait le nombre de tours de l'axe, et au même instant l'eau s'écoulant des tubes était reçue dans trois réservoirs séparés.

On observait de 2 en 2 minutes les thermomètres indiquant les les températures finales de ces trois courants d'eau ; la température initiale était la même pour les trois et variait fort peu pendant une expérience. Soient maintenant en premier lieu N le nombre total des tours du tourillon et P la charge faisant équilibre au frottement, on a pour le travail dépensé :

$$F = 2 \pi L N P.$$

Soient d'un autre côté i la température initiale de l'eau, f, f', f'', les températures aux trois sorties, et m, m', m'', les poids d'eau écoulés par chacune. Le nombre de calories emportées par l'eau et dues au frottement sera :

$$Q = m (f - i) + m' (f' - i) + m'' (f'' - i).$$

Et ce nombre exprimerait tout le calorique dû au frottement si l'appareil ne recevait ou ne perdait nulle autre trace de chaleur.

Avant d'indiquer la méthode très-simple par laquelle j'ai opéré la correction que comportait nécessairement le nombre Q, je parlerai d'abord d'un procédé, très-important dans ses résultats, à l'aide duquel j'ai posé deux limites supérieure et inférieure que les valeurs réelles de l'équivalent mécanique ne pouvaient en aucun cas atteindre.

Si Q exprimait la chaleur totale due au frottement, $\frac{F}{Q} = \Sigma$ exprimerait la valeur exacte de l'équivalent pour chaque expérience. Mais Q est toujours trop fort ou trop faible : il est trop fort quand la température moyenne de l'appareil est *inférieure* à celle des corps ambiant ; il est trop faible quand cette température est supérieure. Il en résulte que Σ sera au contraire trop faible dans le premier cas et trop fort dans le second.

Or la disposition de l'appareil me permettait précisément de le placer à coup sûr dans l'un ou l'autre de ces cas.

En effet, d'une part, on pouvait prendre l'eau d'alimentation à telle ou telle température voulue ; Θ étant la température de l'appartement, on pouvait disposer de i, de manière à avoir $i <= \text{ou} > \Theta$. D'autre part, en réglant convenablement les quantités d'eau écoulées par unité de temps, on pouvait encore faire que f, f' et f'' prissent telle ou telle valeur voulue.

Supposons donc d'abord $i < \Theta$; réglons les courants de façon à obtenir à fort peu près f, f' et $f'' = \Theta$. Il est certain alors que toutes les parties de l'appareil seront à une température plus ou moins inférieure à Θ. L'appareil ne pourra que *recevoir* du calorique des corps environnants. La valeur de Q sera trop élevée et celle de Σ' trop faible.

Faisons maintenant $i = \Theta$, et réglons les courants de manière à obtenir à fort peu près $(f, f', f'' - i) = \Theta - i$, c'est-à-dire de manière à ce que l'eau *en sortant* de l'appareil ait autant de degrés au-dessus de Θ, que dans la première expérience l'eau en entrant en avait au-dessous. Il est évident encore dans ce second cas que les parties de la balance, se trouvant toutes à une température

supérieure à Θ, ne peuvent que *perdre* du calorique. Q sera donc maintenant trop faible et Σ'' *trop fort*. La vraie valeur de Σ sera donc positivement à chercher entre ces deux extrêmes faux Σ' et Σ''. Chacun sait combien il est utile dans les sciences d'observation de pouvoir se poser de telles limites, et nous allons bientôt le reconnaître pour le cas particulier.

Afin de savoir si Σ était plus près ou plus loin de Σ' que de Σ'', voici l'expérience corrective à laquelle j'ai eu recours.

Les contrepoids étant enlevés des plateaux de manière à ce que la pression des coussinets sur le tourillon fût reduite à son minimum, l'arbre fut mis à son minimum de vitesse (1 tour par seconde); de cette façon le travail absorbé et par suite la chaleur produite par le frottement étaient relativement très-faibles. Dans cet état de choses on faisait passer comme de coutume un courant d'eau par le coussinet et le tourillon, en ayant soin de diminuer ce courant de telle sorte que l'eau initialement à $(\Theta - i)^{\circ}$ au-dessous de la température de l'appartement, eût en s'échappant la température Θ de celui-ci.

Soient S le nombre de calories obtenues ainsi en 1 heure par exemple, F le travail pris par le frottement pendant le même temps. On a $R = S - \frac{F}{\Sigma}$ pour le nombre de calories cédé par l'air à l'instrument, Σ étant supposé être la vraie valeur de l'équivalent mécanique.

Il est vrai que cette valeur est inconnue pour le moment et que c'est même elle que nous cherchons à connaître en général. Mais comme F est un très-petit nombre, nous pouvons mettre pour Σ une valeur approximative trouvée, par exemple, en prenant la moyenne entre nos deux extrêmes ci-dessus Σ' et Σ''.

Cette moyenne pour la charge *minima* actuelle, mais pour des vitesses plus considérables, était $400^{k \cdot m \cdot}$. On a donc $R = S - F : 400$ pour le nombre de calories dû à l'air ambiant, et qui sera à déduire de Q, lorsque, dans une expérience proprement dite, l'appareil aura fonctionné aussi une heure. Pour un temps quelconque T,

et toujours avec les mêmes températures $f, f,' f''$ et i, la correction était $\frac{RT}{3600}$ (la seconde étant l'unité de temps).

Afin d'aller au-devant de toutes les critiques, je dois faire ici une remarque qui sans doute sera venue déjà à l'esprit du lecteur.

Les coussinets des supports sur lesquels repose l'arbre et particulièrement le coussinet C, supportait le poids de l'appareil multiplié, pour C par exemple, par le rapport des longueurs $\frac{l}{l'}$. Les deux coussinets et surtout le dernier s'échauffaient donc par le frottement. Comme le fer est bon conducteur, ne se peut-il pas que cette chaleur vienne s'ajouter en partie à celle que produit le tourillon? Dans ce cas le nombre Q serait toujours forcé en un sens du moins.

Il serait facile de prouver, qu'en raison du faible diamètre de l'arbre dans ces coussinets, le travail perdu en frottement et par conséquent la chaleur développée sont très-faibles. Toutefois, pour opérer le plus possible expérimentalement, j'ai vérifié directement la valeur de cette source de calorique accessoire. Dans ce but, les coussinets C C, C' C' avec leurs leviers ayant été enlevés, je fis passer sur le tourillon une corde sans fin faisant courroie et passant par le bas sur une poulie très-mobile, dont l'axe était tiré vers le sol et verticalement, par un poids égal au poids maximum de tout l'ensemble de la balance.

Le coussinet C de l'arbre se trouvait donc dans les conditions de pression les plus élevées. L'arbre étant mis en mouvement à sa plus grande vitesse, un courant d'eau à la température de la chambre fut dirigé par le tourillon. L'action pertubatrice du frottement du coussinet était ainsi aisée à reconnaître. J'ai pu me convaincre qu'elle n'entrait pas pour $^1/_{1000}$ dans la valeur de Q, pour le cas le plus défavorable.

J'ai réuni en un tableau les expériences les plus saillantes que j'ai faites avec l'appareil qui vient d'être décrit (1).

(1) Voyez le tableau G.

Quelques remarques sont nécessaires pour faire comprendre les dispositions numériques que j'ai adoptées pour rendre les chiffres de quelques colonnes plus faciles à saisir.

Bien que toutes les expériences aient duré près de 30$^{m.}$ et quelquefois 60$^{m.}$, sans compter ce qu'on pouvait nommer l'introduction expérimentale, j'ai ramené tous les résultats à la seconde, prise pour unité, pour que l'œil puisse saisir plus facilement les relations des divers nombres. En un mot la durée totale en secondes a servi de diviseur au nombre de tours total du tourillon, tout comme au poids d'eau qui s'écoulait par les deux coussinets et le tourillon.

On se rappelle que l'eau froide, prise à un même réservoir, se séparait en courants distincts pour passer par le tourrillon et les coussinets. Bien qu'il fût possible d'obtenir à très-peu près l'égalité des températures aux trois orifices de sortie, il n'en est pas moins vrai, que pour opérer juste, il fallait faire séparement le produit de chaque différence de température par le poids d'eau écoulé qui y répondait. C'est la somme de ces trois produits qui figure dans la colonne VIII. Pour rendre les éléments de ces nombres plus saisissables au lecteur, j'ai réuni la somme des trois poids d'eau dans la colonne VII, et par cette somme j'ai divisé ensuite le nombre réel Q de calories pour obtenir une différence moyenne de température δ (colonne VI) qui eût été la véritable différence expérimentale commune, si l'on avait pu obtenir l'égalité absolue des températures aux orifices de sortie.

J'ai indiqué clairement, je pense, la formation de la correction convenable à chaque expérience.

Le signe — ou + des chiffres de la colonne IX de correction dépend, comme on conçoit, de la valeur de la température de l'appartement.

L'eau étant par exemple d'abord au-dessous de la température ambiante, l'appareil enlevait nécessairement du calorique à l'air : le nombre correctif doit donc être soustractif, etc.

Les titres mêmes des colonnes, et les annotations algébriques qui

s'y trouvent, ne laissent, j'espère, aucune équivoque sur les nombres qui y figurent.

L'ensemble des résultats de ce tableau démontre positivement que l'équivalent mécanique de la chaleur, pour les frottements médiats, est une fonction de la pression. En effet, en s'arrêtant aux extrêmes, on voit que la valeur *maxima* et impossible Σ'' (exp. 6) n'atteint pas même la valeur *minima* et impossible aussi de Σ' (exp. 7). Indépendamment de toute correction, ce procédé de *limitation à l'absurde* rend incontestable la proposition avancée. Les corrections convenablement faites, laissent voir la variabilité de l'équivalent dans tout son jour.

Ce n'est point ici le lieu de discuter ni la cause ni la signification de cette variabilité. Je le ferai ailleurs avec toute l'attention que mérite ce sujet si vaste de la physique moderne. Pour le moment je me borne à constater un fait. Toutefois, en raison de l'importance du fait, je crois que trop de garanties ne sauraient être superflues. Et la meilleure manière de les présenter, c'est de faire en peu de mots le récit de la route que j'ai suivie pour les constater.

Le chiffre moyen que m'avait donné ma première balance était de $371^{k.m.},6$, avec toutes sortes de vitesses et une même pression. Les premiers nombres que j'obtins avec le nouvel appareil furent $406^{k.m.}$. J'avais opéré avec les mêmes soins autrefois que maintenant. Devais-je me résoudre à taxer d'inexacte l'une ou l'autre de mes séries d'expériences ?

J'étais encore si convaincu de l'invariabilité de l'équivalent pour un même ordre de phénomènes, que je me résignais déjà en moi-même à admettre l'imperfection des méthodes d'investigation, lorsqu'une expérience, où j'avais par hasard diminué considérablement la charge de mes plateaux de balance, me donna un nombre autre que $406^{k.m.}$. Mon attention fût éveillée dès-lors. Je me rappelai que la charge du coussinet de l'ancienne balance donnait à peine $6^{k.}$ par $0^{m.2},01$, tandis que la plus faible charge de la nouvelle balance portait la pression à $64^{k.}$ par décimètre carré. J'opérai donc

de suite à des charges très-différentes, tantôt 6400$^{k.}$ par mètre carré, tantôt 70000$^{k.}$. La différence devenue évidente entre les équivalents obtenus, m'autorisa à l'instant à conclure que mes premières recherches étaient réellement très-approximatives, et que l'équivalent ne s'était élevé de 371$^{k.m.}$,6 à 406$^{k.m.}$, et à 451$^{k.m.}$, qu'en raison des énormes variations de la pression exercée sur les surfaces frottantes.

J'espère qu'on me pardonnera ce court historique de mes propres expériences : historique ou je me dépouille franchement et consciencieusement de ce mérite si cher à la vanité de l'observateur, d'avoir su prévoir une suite de faits. En se dépouillant ainsi, plus d'un physicien aurait donné à ses recherches pénibles une validité que lui a enlevée aux yeux du public l'arrière-pensée qu'elles étaient la suite d'un système préconçu.

Quoiqu'il en soit, nous pouvons formuler ainsi les résultats expérimentaux.

Les données obtenues avec l'ancienne balance à frottement, sont en harmonie avec celles que fournit la seconde balance. La différence de valeur de l'équivalent mécanique obtenu, dérive d'une cause propre au phénomène du frottement et non d'erreurs d'observations. C'est aux variations des charges sur les surfaces glissantes que sont dues les variations de l'équivalent.

CHAPITRE VII.

NOUVELLES EXPÉRIENCES SUR LA CHALEUR QUI SE DÉVELOPPE DANS LE CORPS HUMAIN, SELON QU'IL EST EN REPOS OU EN MOUVEMENT.

Les réflexions que j'ai présentées au début du chapitre précédent trouvent encore ici une application naturelle. Les valeurs trouvées dans mes premières expériences pour l'équivalent mécanique de la chaleur humaine exigeaient une vérification et un contrôle qui ne laissassent aucun doute. Or, avec l'ancien appareil, je ne pouvais plus que faire des répétitions qui, toutes, conduisaient à peu près aux mêmes résultats généraux. Je songeai donc bientôt à modifier, du moins autant qu'il se pourrait, l'instrument et les méthodes d'investigation.

Pour ne pas entrer dans d'inutiles répétitions, je prie le lecteur de se reporter à tout ce qui a été dit (pages 51 et suivantes) et je me borne à indiquer ici les changements effectués.

Modifications apportées aux appareils (1).

1° La chambrette calorimétrique a été placée dans un appartement spécial et isolé, beaucoup plus hermétique et moins sujet aux variations de température.

(1) Les lignes ponctuées, fig. 1 et 2, pl. III, indiquent les modifications de l'appareil.

2° La forme primitive a été modifiée en celle d'un parallélipipède rectangle de 0m·, 6 de largeur, 2m·,5 d'élevation et 1m·,8 de profondeur. Le volume par suite s'est trouvé agrandi considérablement.

3° Un agitateur de grande dimension fut ajouté au premier, et placé en arrière à la moitié de la hauteur. L'air étant remué dans le bas et le haut de la chambrette, des couches d'inégale température ne pouvaient plus s'établir d'aucune façon.

4° La roue à palettes, qui formait l'escalier mouvant sur lequel marchait la personne soumise à l'essai, fut disposée de manière à pouvoir tourner dans les deux sens, et avec diverses vitesses.

Méthode d'expérimentation.

Ayant constaté, par des expériences préalables, que le volume expiré par l'homme en repos ou en mouvement est égal au volume aspiré ou du moins si rapproché de l'égalité, qu'avec mes appareils je ne pouvais trouver de différence, je modifiai totalement la marche que j'avais suivie d'abord. Dès qu'on se trouvait dans la chambrette calorimétrique, on prenait en bouche un tube de caoutchouc conduisant l'air au gazomètre, et l'on aspirait par le nez l'air de la chambrette pour le pousser par la bouche dans la cloche, dont la fermeture hydraulique était levée. La porte de la chambrette était fermée hermétiquement; mais au bas de l'appareil on laissait d'abord une petite ouverture qui permettait à de l'air frais d'entrer à mesure que l'opérateur en envoyait dans le gazomètre. Une autre ouverture, que l'on pouvait aussi fermer hermétiquement, permettait d'introduire temporairement dans la chambre un fer chaud, pour hâter l'échauffement interne et l'amener en peu de temps au point stable.

Au bout d'un quart d'heure environ, on plaçait sur le gazomètre son petit couvercle hydraulique, et l'on comptait exactement la durée de l'ascension (qui en raison des dimensions nouvelles se trouvait doublée par rapport aux premières expériences). Vers le milieu de la période de l'ascension, on extrayait de la chambrette, à l'aide d'un appareil aspiratoire convenable, un volume suffisant pour une analyse exacte.

Lorsque la cloche était montée, la personne déposait le tube de caoutchouc, et respirait alors librement dans la chambrette, jusqu'à ce que le thermomètre fût devenu parfaitement stationnaire.

On voit d'après ce qui précède que l'opération se divisait en trois périodes : 1° la première, en quelque sorte préparatoire, durait jusqu'à ce que la personne soumise à l'essai fût arrivée à un régime stable de respiration et de caloricité ; 2° la deuxième servait à faire connaître le volume d'air aspiré et expiré en un temps donné, à cet état de régime stable ; 3° la troisième servait à faire connaître la chaleur produite en un temps donné ; car pendant cette période, la personne était complétement isolée de l'air externe, et toute sa chaleur contribuait à maintenir le calorimètre au degré stable final.

Méthodes eudiométriques.

Sans pouvoir introduire de changement complet dans les procédés, j'ai fait mon possible pour perfectionner ceux dont je disposais. Contraint d'opérer toujours sur la cuve à eau, j'ai apporté plus de soins encore à éviter ou à éluder les défectuosités inhérentes à ce procédé, et j'ai réussi assez en ce sens pour que des analyses faites à plusieurs reprises sur le même air ne me donnassent guère de différences de plus de 0,002.

Quelques réflexions critiques ne seront pas inutiles maintenant, au sujet des conséquences qu'ont eues les modifications dont il vient d'être parlé.

1° L'agrandissement du volume et l'accroissement de l'agitation interne de l'air de la chambrette calorimétrique ont eu pour résultat immédiat d'accroître les pertes de calorique éprouvées par l'appareil en un temps donné, pour un excès donné de la température stable interne sur la température stable externe de l'air. C'est ce que chacun comprend à première vue.

Au lieu de 25c.,75 que perdait par heure l'ancien appareil, le nouveau perdait maintenant 36c.,9 pour chaque excès de 1 degré de la température interne sur celle de l'air ambiant. C'est ce qui

fut constaté avec soin, comme il a été dit, à l'aide d'un bec à gaz hydrogène (page 55).

L'usage de la chambrette calorimétrique, dans ces nouvelles conditions, devenait ainsi une véritable épreuve contradictoire pour les premières expériences. Si, comme cela se vérifia en effet, nous trouvions encore le même nombre qu'autrefois pour la quantité de calorique produite chez les individus en repos, par l'absorption de 1gr. d'oxigène, c'est que positivement ce nombre méritait confiance.

2° Dans les premières expériences, on était obligé de calculer la chaleur développée par l'individu à l'aide de trois éléments très-distincts: à l'aide de l'excès stable de température de l'air interne du calorimètre; à l'aide de l'excès de température avec lequel sortait l'air expiré, et enfin à l'aide de l'eau évaporée dans les poumons.

Dans les nouvelles expériences, au contraire, l'individu finissait par respirer librement dans le calorimètre, jusqu'à ce que la température stable fût atteinte. Toute la chaleur émise par lui s'accumulait dans l'appareil, et se traduisait précisément par cet excès stable qui amenait l'égalité entre les pertes calorifiques de l'appareil et de l'individu. Le calcul ne portait plus que sur un seul nombre.

L'accord des résultats dans les deux méthodes, également bonnes d'ailleurs, est une nouvelle preuve de leur exactitude.

3° La suppression des deux tubes que l'individu était obligé de maintenir dans le nez, pour aspirer l'air externe puisé dans un gazomètre, cette suppression, dis-je, a singulièrement facilité le travail respiratoire et a permis de doubler le volume du gazomètre qui recevait l'air expulsé.

Le volume d'air aspiré et expiré en un temps donné, se trouvait ainsi apprécié avec une exactitude plus grande.

4° L'expérience, disons-nous, se divisait en deux périodes prin-

cipales. La première qui suivait la période d'introduction préparatoire, servait à mesurer la quantité et la qualité des produits respirés. L'autre qui succédait, servait à apprécier la chaleur émise. Une question naturelle se présente ici. L'individu restait-il dans les mêmes conditions pendant ces deux périodes? S'il en était autrement, les résultats seraient faux. Or, dans le premier cas, l'individu attirait sans cesse dans le calorimètre un volume d'air frais égal à celui qu'il chassait dans le gazomètre. Dans le second cas, il respirait dans un espace maintenu parfaitement clos, et où l'air ne se renouvelait plus. On pourrait donc craindre que la calorification ne se trouvât modifiée fortement par ce fait.

Deux remarques suffiront pour éliminer ce doute:

En premier lieu, le volume du calorimètre était tel, que dans les plus mauvaises conditions l'individu aurait pu y rester cinq heures sans être incommodé par le manque d'oxigène; or il y restait au plus une demi-heure, une fois que le gazomètre jaugeur était rempli. En second lieu, des expériences que je crois assez importantes au point de vue physiologique, m'ont prouvé, comme nous verrons plus loin, que des modifications assez considérables dans la composition de l'air respiré n'ont qu'une très-petite influence sur la quantité d'oxigène absorbé par les poumons en un temps donné.

L'altération très-faible des proportions de l'oxigène de l'air dans la chambrette n'a donc pu avoir aucune conséquence fâcheuse pour l'exactitude des observations.

Résumé général des conséquences qui découlent des expériences sur la chaleur humaine.

Les physiciens, les chimistes,.... aiment à réunir sous forme de tableaux les résultats numériques de leurs expériences; l'œil exercé suit rapidement les conclusions naturelles qui découlent des expériences devenues ainsi en quelque sorte *parlantes*. Si je ne m'adressais qu'à ce genre de lecteurs, je pourrais maintenant me borner à renvoyer aux deux tableaux (E et F) où se trouvent relatés dans leurs plus minutieux détails les éléments de mes expériences. Mais

comme une suite d'études et d'observations sur la chaleur vitale intéressera, j'espère, aussi les physiologistes et les médecins, qui au contraire par la nature même de leur science sont moins habitués à ces traductions numériques si arides en apparence, et qui s'effraient et se rebutent volontiers à l'aspect de tableaux uniquement formés de chiffres, je pense bien faire en cherchant à condenser, en quelques propositions simples et faciles à retenir, les principaux résultats de mes recherches.

I. Ainsi que l'admettent, quoique d'une manière trop absolue, la plupart des physiciens, l'acte de la respiration peut être regardé comme la cause principale du développement de calorique dans le corps de l'homme et des autres animaux vertébrés.

Mais les résultats quantitatifs de cet acte varient du tout au tout, selon que l'individu est à l'état de repos ou à l'état de mouvement, et ils doivent être considérés séparément sous ces deux faces.

État de repos.

II. Dans l'homme en repos, la quantité de calorique développé en un temps donné, est *à peu près proportionnelle* à la quantité d'oxigène absorbé pendant le même temps; absorption qui est la conséquence directe de l'acte respiratoire. Chaque gramme d'oxigène enlevé par les poumons à l'air aspiré produit environ $5^{ca.}$,22, c'est-à-dire la quantité de calorique nécessaire pour élever de 1° la température de $5^{k.}$,22 d'eau.

III. Nous disons *à peu près, environ*. Ces mots restrictifs, en effet, sont à leur place ici. Le rapport de l'unité en poids d'oxigène consommé au nombre d'unités de calorique développé, autrement dit *l'équivalent calorifique* de l'oxigène varie légèrement d'un individu à l'autre, et pour le même individu dans des limites resserrées, il est vrai, mais que pourtant je crois réelles et non des résultats d'erreurs expérimentales.

IV. La digestion, l'assimilation alimentaire en général, les mille et mille sécrétions et transformations chimiques qui s'opèrent dans

l'organisme, doivent certainement contribuer à augmenter où à diminuer le développement du calorique.

Elles y entrent toutefois pour une part beaucoup plus faible qu'on ne pourrait être porté à le croire, et ce n'est pas à elles en tout cas qu'on est en droit d'attribuer les variations que j'ai pu observer dans le rapport de l'oxigène absorbé au calorique produit. En effet, dans mes expériences on tenait compte de l'état des individus : ils étaient tantôt fatigués par un travail prolongé, par des courses, tantôt à l'état de repos complet ; ils étaient tantôt à jeun, tantôt repus, tantôt en pleine digestion. L'équivalent calorifique ne variait pas pour cela plus que quand on opérait sur deux individus tout à fait dans les mêmes conditions *actuelles*. J'ajouterai que j'ai expérimenté avec soin sur moi-même, soit au début d'une fièvre assez intense, soit avant ou après d'énergiques soustractions de calorique opérées par des lotions d'eau froide générales (traitement hydropathique) ; et je n'ai pas obtenu non plus de différences marquées dans notre nombre. Toutes les actions internes dont nous venons de parler, influent certainement sur notre équivalent ; mais il faudrait des expériences beaucoup plus justes que les miennes pour mettre cette influence à jour.

V. Et provisoirement nous devons admettre que les variations de notre rapport sont dues bien plutôt à ce que l'oxigène absorbé ne se combine pas toujours de la même manière absolue et identique avec les mêmes éléments combustibles qu'il trouve dans le corps.

VI. La quantité d'oxigène absorbé, et par suite, la quantité de chaleur produite, varient non seulement d'une personne à l'autre, comme cela se conçoit aisément, mais d'une époque à l'autre, d'un jour à l'autre, chez le même individu. Il serait certainement très-important d'étudier expérimentalement ces variations pour en trouver la cause.

VII. Mais supposons maintenant qu'une personne se trouve pendant une période d'une certaine durée dans les mêmes conditions de développement calorifique : trois choses essentielles peuvent varier encore pendant cette période et alors sans avoir aucune influence

sur les poids d'oxigène absorbé en un même temps : 1° le nombre des respirations, par heure (par exemple); 2° le volume total d'air aspiré et expiré pendant cette heure ; 3° et enfin la quantité relative d'oxigène enlevée à l'air sur le volume total, autrement dit, *la puissance absorbante des poumons.*

Il résulte de là, pour nous servir du langage mathématique, que le dernier de ces éléments est une *fonction inverse* des deux premiers, c'est-à-dire que si le volume aspiré et expiré par heure vient à croître, soit par suite de l'accélération, soit par suite de l'augmentation d'amplitude du mouvement respiratoire, la quantité relative d'oxigène saisie diminuera en proportion inverse exacte. Et si, par hasard, deux individus produisent la même chaleur et consomment le même poids d'oxigène, il se pourra que l'un aspire 800 litres d'air par heure, tandis que l'autre n'en aspire que 400 : mais il est certain que les poumons du premier enlèveront seulement 2 p. °/₀ d'oxigène à l'air, si ceux du second en prennent 4 p. °/₀. C'est ce qui ressort clairement des expériences du tableau E et F. Il résulte de là que la puissance absorbante des poumons vis-à-vis de l'oxigène ne repose pas simplement, comme on pourrait être porté à le croire d'abord, sur un simple phénomène d'endosmose, sur une propriété passive, ou du moins purement physique, des tissus pulmonaires ; mais qu'elle dépend d'un état de vitalité générale, gouverné dans ces tissus par le système nerveux tout entier.

Ce fait résulte aussi d'autres expériences que j'ai faites accessoirement et dont il serait trop long de donner ici les détails, mais dont l'ensemble établit : 1° que la quantité d'oxigène absorbée par les poumons n'est pas du tout diminuée ou augmentée d'une manière directement proportionnelle aux variations que l'on fait subir aux proportions relatives de l'azote et de l'oxigène ; 2° que cette quantité n'est proportionnelle, d'une manière absolue, ni à la durée du séjour de l'air dans les poumons, ni à la vitesse de la respiration, ni à son amplitude, ni à la vitesse de la circulation (estimée par le nombre de pulsations), mais qu'elle dépend d'une manière complexe de tous ces éléments à la fois ; 3° et qu'en somme elle est gouvernée d'une manière des plus remarquables par les besoins de l'organisme à chaque instant.

État de mouvement.

Lorsque nous nous livrons à une expérience ou à un travail régulier, plusieurs phénomènes connus de tout le monde, mais pourtant très-dignes d'attention, se manifestent : la vitesse de la respiration et du pouls s'accroît, les aspirations deviennent plus profondes ; une chaleur plus considérable se fait sentir, et se répand plus complètement dans toutes les parties du corps. En faisant l'analyse de l'air expiré, nous reconnaissons qu'il est plus dépouillé d'oxigène et plus riche en acide carbonique que quand nous sommes au repos : *la puissance absorbante* des poumons s'accroît en un mot aussi.

L'accélération du mouvement respiratoire, l'accroissement de son amplitude, et l'augmentation du pouvoir absorbant, conspirent à augmenter la consommation en poids de l'oxigène pour un même temps.

L'accroissement de développement de calorique est-il proportionné à celui de l'oxigène ? Deux cas se présentent ici d'une manière remarquable, et viennent répondre en deux sens opposés.

VIII. Supposons que nous déterminions exactement le poids d'oxigène consommé par heure par l'individu qui se livre à un travail corporel parfaitement régulier. Il est clair qu'en multipliant ce poids par le nombre 5,2 nous aurons le nombre de calories que produirait ce poids d'oxigène absorbé chez le même individu en repos.

Supposons qu'en même temps nous déterminions le nombre de calories réellement développé pendant le travail. La comparaison de ce nombre réel avec le nombre calculé, comme il vient d'être dit, nous apprendra comment l'oxigène se trouve utilisé au point de vue calorifique.

Eh bien, voici ce que nous observons d'une manière parfaitement claire. Prenons les deux modes de mouvement les plus élémentaires pour exemple :

1° Supposons que nous *montions* un escalier, ou que nous *gravissions* une montagne.

La comparaison de nos deux nombres de calories nous apprendra que le nombre réel produit est *toujours inférieur* au nombre calculé.

2° Supposons que nous *descendions* un escalier ou une montagne. La comparaison de nos nombres nous dira que la quantité de calorique produite est toujours *au moins égale* et *très-souvent supérieure* à la quantité calculée.

Le mouvement ascendant annihile donc dans l'individu une partie du calorique que l'oxigène *est capable* de produire.

La marche descendante non-seulement *n'annihile* rien, mais le plus souvent détermine une production de calorique supérieure à celle dont est capable l'oxigène.

Ces deux faits contraires frappent de nullité toute interprétation physiologique qui ne reposerait pas directement sur la distinction mécanique des deux modes de mouvement. Le fait suivant vient s'ajouter à cette espèce de démonstration forcée, en nous apprenant qu'une loi mathématique précise (aussi précise du moins que peut l'être ce qui concerne les êtres vivants), gouverne les quantités de calorique annihilées dans le premier cas.

IX. En effet, chez le même individu, la différence en moins que nous trouvons entre le nombre de calories calculé, et le nombre réel produit ne repose sur rien de fortuit.

Que faisons-nous en montant un escalier par exemple ? Nous élevons en un temps donné notre poids à une certaine hauteur ; selon que nous marchons plus ou moins vite, nous élevons ce poids à une hauteur plus ou moins grande dans le même temps. Eh bien, faisons dans divers cas le produit de notre poids par les hauteurs atteintes, et comparons ce produit avec le nombre de calories que l'oxigène en produit de moins, nous trouverons, chose singulière, un rapport presque constant entre ces deux éléments en apparence si différents.

Le produit de notre poids par la hauteur gravie est ce qu'on nomme en mécanique le *travail* exécuté par nous. Eh bien, il y a presque proportionnalité entre la somme de ce travail et le nombre de calories que le mouvement ascendant a empêché de se produire.

X. La loi qui préside au second genre de phénomène est moins nette, ou plutôt il faudrait des expériences très-variées pour la mettre en relief; mais le principe général s'entrevoit déjà facilement.

XI. Je me suis servi de l'exemple le plus simple des deux genres de mouvement. Les résultats seraient rigoureusement les mêmes si au lieu de nous servir de nos jambes pour nous élever ou pour descendre, nous appliquions la force de nos bras à un mécanisme convenable, et si à l'aide de ce mécanisme, nous élevions ou abaissions un poids égal à celui de notre corps (ou à tout autre) à une certaine hauteur en un temps donné.

Il est facile de reconnaître en thèse générale, que tous nos mouvements ou du moins tous leurs résultats peuvent se traduire numériquement par un poids élevé ou abaissé en un temps donné à une certaine hauteur. Lorsque nous traînons, par exemple, un fardeau sur un plan horizontal, l'effort exercé peut s'exprimer en poids, et le chemin parcouru par le fardeau n'est autre chose que la hauteur à laquelle nous aurions élevé ce poids dans le même temps, etc., etc.

Mais quelle est donc la différence qui existe pour le moteur vivant entre ces deux effets : élever un poids ou abaisser un poids?

Au premier abord, le physiologiste répondra que la différence est nulle, et que l'individu travaille dans les deux cas, puisqu'il fait des efforts musculaires. Pour le mécanicien la différence est immense. Pour lui, le moteur qui élève un fardeau est le seul qui travaille; celui qui résiste à un fardeau qui descend et de manière à régulariser la descente, non seulement ne travaille pas, mais devient le collecteur d'un travail exécuté par le fardeau lui-même. Nos chutes d'eau, par exemple, qui nous donnent si souvent et à si peu de

frais de la force motrice, sont-elles autre chose que les réceptacles du travail de l'eau ? Mais rien ne peut se perdre dans la nature. Que deviennent tous ces mouvements produits dans nos chutes d'eau et qui viennent s'anéantir dans nos usines ? Ils produisent de la chaleur, ou de l'électricité ou de la lumière, ou toute autre *force équivalente*. Si nous pouvions placer une filature, un tissage, etc., dans un immense calorimètre, nous trouverions que pour chaque poids d'eau de 372k. à 425k. qui est descendu de 1m. dans notre chute, il s'est développé *une calorie*, une *unité de chaleur*.

Pour le mécanicien donc, l'homme qui élève un fardeau doit faire disparaître du calorique, et celui qui résiste à un fardeau qui descend doit produire du calorique. Pour le mécanicien mes expériences présentent une anomalie. L'individu qui est descendu de 440m. en une heure (exp. 4me), aurait dû développer presque autant de calorique que celui qui s'est élevé de 451m. en a consommé. Or la production est bien moindre. (25ca. au lieu de 421ca.)

XIII. Le muscle qui se contracte, occasionne une dépense de calorique dans l'être vivant. Le muscle contracté qui se détend sous l'action d'un effort externe (d'un fardeau qui descend) ne dépense pas de calorique, et, le plus souvent, en fait produire.

XIV. Nous disons en général que l'exercice corporel nous réchauffe : il importe maintenant de s'entendre sur le sens de cette expression. 1° Nous voyons que chez l'homme qui élève un fardeau, ou qui s'élève en marchant, une partie du calorique que serait capable de produire l'oxigène à l'état de repos, disparaît par suite du travail et ne donne lieu à aucun *échauffement*. Pourtant la plupart des personnes qui montent une montagne prennent chaud et vont même jusqu'à suer. C'est que l'accélération de la respiration et de la circulation, et l'augmentation de la puissance absorbante des poumons produisent une consommation d'oxigène et une production de calorique *exagérées*, et de ce calorique une partie seulement est consommée pour le travail, tandis que l'autre chauffe effectivement l'individu.

2° Il est à remarquer cependant, et c'est là un fait important,

que plus un homme est robuste et habitué à la fatigue, moins il se produit chez lui de ce calorique en excès que nous appelerons *inutile*. Chez cet homme l'absorption de l'oxigène croît beaucoup moins que chez l'individu faible, et cette absorption est d'autant moindre que l'on a mieux *su se faire* à un travail donné.

3° Il est donc beaucoup plus vrai de dire que chez l'individu bien portant et robuste, le travail détermine une *soustraction* de calorique, utile la plupart du temps; et que si ce travail l'échauffe, c'est bien plutôt parce qu'il détermine une juste et équitable distribution de calorique entre tous les organes.

Au point de vue hygiénique, nous voyons la différence qu'il y a entre un exercice modéré et un exercice violent. Le second détermine une absorption d'oxigène exagérée et un excès de calorique non-seulement inutile, mais la plupart du temps nuisible. Le premier, au contraire, ne fait qu'équilibrer le calorique en même temps qu'il opère par les poumons l'élimination d'une partie des principes qui sont devenus inutiles à l'organisme.

XV. La loi qui établit un rapport entre le travail produit par l'animal, et le calorique que ce travail annihile dans l'organisme, fait de l'être vivant un véritable *moteur*, en un sens du moins. L'être vivant doit donc être, comme tel, muni d'un système régulateur qui le mette à même de pourvoir à tous les besoins du moment.

L'appareil respiratoire, circulatoire et musculaire tout entier est en effet gouverné de telle sorte par l'appareil nerveux que dès que le travail mécanique *commence*, les poumons sont mis à même de fournir la quantité d'oxigène qui va devenir indispensable.

Dès les cinq premières minutes de *travail régulier*, la vitesse et l'amplitude du mouvement respiratoire et circulatoire, et la puissance absorbante des poumons se mettent en quelque sorte au diapason du travail que les muscles ont à exécuter; mais la *régulation* et la distribution du calorique reposent encore sur d'autres phénomènes.

XVI. Aristote soutenait que la respiration était nécessaire pour

enlever sans cesse le calorique produit par la vie. Quelques physiciens modernes tombant dans un excès contraire, quoique plus légitime, ont assimilé les poumons à un véritable fourneau placé dans le corps vivant; enfin, d'un autre côté, quelques physiologistes ont dit qu'il ne se produit aucune chaleur dans les poumons, et que le calorique se développe dans tout l'ensemble de l'organisme par suite de l'oxigénation du sang.

La nature, qui n'a aucun système préconçu, a mis d'accord ces trois idées contradictoires. Tout gaz, dont on réduit de force le volume, produit du calorique; tout gaz dont on laisse le volume s'augmenter se refroidit.

L'oxigène condensé par le pouvoir absorbant des tissus pulmonaires, produirait une chaleur nuisible à ceux-ci, si l'acide carbonique ne prenait en même temps la forme gazeuse et n'enlevait par là ce que l'absorption a produit.

L'oxigène, comme on l'a dit maintes fois déjà, est seulement *saisi* par le sang veineux pour être porté dans les divers organes, où s'opèrent ensuite des combinaisons plus définies, et où se produit, par suite, du calorique. Mais ce simple acte d'absorption produit du calorique localement dans les poumons, et ce calorique serait mortel aux tissus, s'il n'était éliminé à l'instant.

Cette élimination se fait d'une manière très-simple :

1° L'air qui pénètre dans les poumons est plus froid que celui qui en sort.

2° Celui qui y entre contient moins de vapeur d'eau que celui qui en sort. Les poumons sont donc refroidis à la fois par le contact de l'air, et par l'évaporation d'une certaine quantité d'eau.

La quantité de chaleur enlevée ainsi dépend, toutes choses égales d'ailleurs : 1° de la température de l'air inspiré; 2° de son degré de saturation de vapeur d'eau; 3° enfin des volumes inspirés et expirés en un temps donné. Elle reste constante tant que ces trois éléments ne varient pas.

Si le travail musculaire ne faisait accroitre que la puissance absorbante des poumons, l'excès d'oxigène saisi déterminerait encore une chaleur mortelle. Mais ce travail augmente en même temps la vitesse et l'amplitude du mouvement respiratoire, et dès lors le refoidissement opéré devient suffisant. On voit (tableau E) que dans l'état de travail, l'air emporte plus de chaleur des poumons que pendant le repos. On voit en même temps que la chaleur développée et perdue par les poumons varie des ($^{9}/_{100}$) aux ($^{16}/_{100}$) de la chaleur totale produite (exp. 1 et 4, tableau E, par exemple).

L'opinion d'Aristote (en un sens du moins) et les deux opinions des physiologistes modernes ont donc raison à la fois, et sans nulle contradiction paradoxale.

XVII. La loi d'équivalence qui, dans l'être vivant, relie le travail mécanique exécuté avec la chaleur produite en moins par la respiration, cette loi assimile, disons-nous, ce moteur vivant à nos moteurs mécaniques en général. Cependant l'être vivant n'est point ce que nous nommons un moteur à calorique. Ce n'est point le calorique produit par la respiration qui peut déterminer les contractions musculaires, sous l'action de notre volonté.

Il s'ensuit que, dans l'être vivant, le calorique se trouve en équilibre avec une autre force, l'électricité, le fluide nerveux, comme on voudra. Et l'oxigène absorbé pendant le travail donne d'autant moins de calorique qu'il produit plus de cette autre force qui détermine les contractions musculaires.

XVIII. Cependant si les idées de quelques physiciens modernes sur la nature du calorique, de l'électricité, etc., étaient justes; si ces principes n'étaient que des transformations de différents mouvements les uns en les autres, et si surtout le moteur vivant était aussi véritablement une machine que quelques-uns le pensent, il faudrait :

1° Que le rapport du travail produit au calorique disparu fût *constant* et parfaitement égal chez tous les individus;

2° Et que dans l'homme ou l'animal qui abaisse un fardeau, qui

descend son propre corps, il se produisit toujours autant de calorique en plus, qu'il s'en produit en moins dans les phénomènes contraires.

Or, c'est ce que l'expérience dément formellement.

Les propositions précédentes sembleront peut-être tranchantes à force de précision. Si on les examine avec attention on reconnaîtra cependant qu'elles ne sont que la traduction fidèle, en langage ordinaire et développé, des tableaux numériques, autrement dit des résultats de l'expérience. Il s'agit donc de savoir si ces résultats ont un caractère suffisant de précision : je ne puis ici qu'exprimer le vœu de les pouvoir vérifier moi-même ou de les voir vérifier par d'autres expérimentateurs sous une forme beaucoup plus générale et avec des moyens plus exacts que ceux dont je disposais. Cette tâche sera moins difficile qu'elle ne pourrait le paraître d'abord; et, d'après toutes les remarques que j'ai eu occasion de faire en opérant, je crois qu'on arrivera aisément à obtenir, dans ces recherches sur le moteur animé, autant d'exactitude que dans bien d'autres expériences de physique.

L'usage d'une chambrette calorimétrique à parois métalliques très-minces, de thermomètres différentiels indiquant, à $^1/_{100}$ de degré près, l'excès de la température de l'air interne sur celle de l'air externe, d'un appareil à soupape recouvrant hermétiquement le nez et la bouche de l'individu essayé, etc., permettraient de pousser l'approximation à $^1/_{1000}$ près, soit pour l'évaluation de la chaleur émise, soit pour le dosage de l'oxigène consommé.

Il est indubitable que ces recherches, faites avec rigueur sur l'homme en repos, ou en mouvement, conduiraient sous peu à des résultats utiles sous bien des rapports, et serviraient d'épreuve expérimentale à la validité de bien des doctrines qui ont la prétention de se poser au-dessus de l'expérience.

CHAPITRE VIII.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR LA COMBUSTION DE L'HYDROGÈNE DANS L'AIR.

Dans mes recherches sur la chaleur développée par le corps humain soit en repos soit en mouvement, la personne soumise à l'expérience était placée dans un calorimètre spacieux, où elle respirait librement, et elle y restait jusqu'à ce que la température interne de l'appareil, après s'être graduellement élevée au-dessus de celle de l'air externe, fût devenue parfaitement stable.

Dans cet état de choses, il est clair que le calorique développé dans l'être vivant remplaçait précisément et d'une manière certaine celui que perdait l'appareil.

Pour arriver à une comparaison avec une unité arbitraire d'abord, j'ai fait brûler dans l'appareil un jet continu et régulier de gaz hydrogène pur, et j'ai mesuré l'excès stable de la température interne sur la température externe produit par une dépense connue de gaz.

L'être vivant se trouvait ainsi représenté par un équivalent calorifique d'hydrogène. Ensuite, pour arriver à un nombre absolu, j'ai admis que le gramme d'hydrogène donne 34$^{cal.}$,463. On sait en effet que MM. Favre et Silbermann, dans leurs belles expériences sur la combustion, ont fixé à 34$^{cal.}$,463 le nombre de calories développé par la combustion de 1 gramme d'hydrogène pur dans l'oxigène pur.

Nous disons dans l'oxigène pur. Pour nos essais la combustion au contraire se faisait dans l'air, dans un mélange de $\frac{1}{5}$ d'oxigène avec $\frac{4}{5}$ d'azote. Pouvais-je ainsi, à coup sûr, admettre une identité parfaite entre les quantités de chaleur développées par le gramme d'hydrogène dans deux cas aussi différents? Il est clair cependant que c'est d'une telle supposition que dépendait l'exactitude de la graduation de mon calorimètre.

Il y a quelques années déjà, j'avais fait dans un but spécial une suite d'expériences sur la combustion de l'hydrogène dans l'air, et la moyenne que j'avais obtenue convergeait vers le nombre de MM. Silbermann et Favre. Toutefois mes expériences n'avaient ni une précision suffisante pour mériter d'être publiées, ni même pour fixer d'une manière définitive ma propre opinion. Afin de lever tous les doutes, je résolus donc de les reprendre avec tous les soins nécessaires. Comme elles ont été faites à la fois pour répondre à la question que j'ai posée plus haut et surtout pour résoudre un autre problème beaucoup plus élevé, je crois devoir donner les plus minutieux détails tant sur la construction de l'appareil calorimétrique employé que sur la manière dont j'en ai fait l'emploi.

Description du calorimètre.

MM' MM', manchon cylindrique en cristal de 0m·,4 de diamètre et de 0m·,4 de hauteur.

mm' mm', manchon concentrique au précédent de 0m·,1 de diamètre et de 0m·,3 d'élévation. Ces deux cylindres, posés sur le plateau DD, sont scellés hermétiquement à leur base à l'aide de mastic introduit entre le verre et les rebords métalliques *rr, r'r'*.

CCC, chapeau conique à double paroi formant le dessus du cylindre interne. Le tronc de cône qui forme la paroi intérieure est ouvert en *oo*; l'anneau *aa* en *s* est percé d'une ouverture à laquelle s'applique l'extrémité d'un tuyau de plomb de 0m·,01 de diamètre interne roulé en spirale à quelques centimètres de hauteur du disque DD. L'autre extrémité de cette spirale, de 8m· de déve-

loppement, sort en *b* du plateau et se trouve en rapport avec un gazomètre à l'aide d'un tube en caoutchouc. Par suite de ces dispositions, le grand cylindre MM' MM' peut être rempli d'eau complètement, et un courant d'air régulier peut être produit de bas en haut dans le cylindre *mm' mm'* à travers le serpentin en plomb, lorsqu'on soulève le gazomètre.

La partie supérieure du cylindre est recouverte avec un disque en bois qui donne passage : 1° à l'axe vertical d'un agitateur à ailes obliques, mu mécaniquement par un fil passant sur la poulie *p* ; 2° à un thermomètre divisé en 0,1 de degré ; 3° à la tige d'un thermomètre à air permettant d'apprécier très-facilement des cinquantièmes de degré.

On voit que l'instrument ainsi décrit constitue en définitif un calorimètre *diaphane* de dimensions relativement énormes.

En effet, si l'on introduit dans le cylindre *mm' mm'* un corps quelconque facilement combustible, la combustion sera entretenue à l'aide du gazomètre aspirateur, et la chaleur développée se communiquera à l'eau, soit par rayonnement, soit par contact à l'aide du serpentin. On verra bientôt pourquoi ce calorimètre a été rendu diaphane et pourquoi il était nécessaire de lui donner des dimensions aussi grandes. Occupons-nous d'abord de la marche de l'expérience en elle-même, et puis ensuite des méthodes d'évaluation convenables à ce genre d'expérience. Occupons-nous d'abord des méthodes de calcul et de correction qu'il nécessitait pour donner des résultats calorimétriques dignes de confiance.

Méthodes de calcul appliquées au calorimètre.

Il est clair que si, pendant le cours d'une expérience, le calorimètre ne recevait ou ne perdait point de calorique par son contact avec l'air et avec les corps environnants, et que si de plus le verre, le fer, le plomb, etc., qui le forment, n'enlevaient point de calorique à l'eau qui s'y échauffe, il suffirait de multiplier le poids connu de cette eau par le nombre des degrés qu'elle a acquis pendant la combustion, pour connaître exactement la quantité de calorique développée pen-

dans ce phénomène chimique. Mais : 1° les parois solides de l'appareil se mettant sans cesse à la température de l'eau à mesure qu'elle s'élève, et 2° l'ensemble de l'instrument n'étant jamais qu'un instant très-court à la température de l'air ambiant, il perd ou reçoit donc sans cesse du calorique étranger au phénomène même que l'on veut observer.

Une expérience assez simple donne avec exactitude le poids d'eau que représente l'appareil comme réceptacle de calorique. Le calorimètre, complètement vide, étant laissé assez longtemps ainsi pour prendre la température *connue* de l'air ambiant, on y verse rapidement un poids connu d'eau à une température inférieure ou supérieure, mais soigneusement déterminée : au bout de peu d'instants l'eau et l'appareil prennent une même température, différente de celles qu'ils avaient d'abord. L'eau, primitivement à une température i, arrive à une température f; si son poids est P, elle perd ou reçoit ainsi un nombre de calories $P(f-i)$.

Les parois, etc., de l'appareil, d'abord à une température t, arrivent aussi à la même température f : si l'on appelle p le poids d'eau qu'elles représentent, on a $p(t-f)$ pour le nombre de calories qu'elles reçoivent ou perdent. Et comme c'est par suite d'un échange que s'établit la température commune f, on a

$$P(f-i)=p(t-f), \text{ d'où } p = P(f-i):(t-f).$$

Cette expérience, faite avec soin et répétée un nombre de fois suffisant, a donné $p = 2^{k},34$.

C'est donc le nombre constant qu'il fallait ajouter à celui qui, dans chaque expérience, exprimait le poids d'eau connu versé dans le calorimètre.

Supposons maintenant : 1° que la source de calorique placée dans l'appareil soit parfaitement régulière, ou en d'autres termes, que la combustion soit réglée de telle sorte qu'elle développe des quantités de calorique constantes pendant l'unité de temps ; 2° et que l'échauffement ou le refroidissement de l'appareil au contact de l'air soit proportionnel à l'excès en moins ou en plus de sa

température sur celle de l'air (nous verrons bientôt que ces suppositions peuvent être admises pour le cas dont il s'agit). Il va nous être facile de déterminer la correction qu'a nécessitée le fait de l'échauffement ou du refroidissement par l'air.

Nommons E l'échauffement de l'appareil en degrés par unité de temps, dû à la combustion; R, l'échauffement ou le refroidissement de l'appareil pour un excès de 1° en moins ou en plus sur la température ambiante; i cette température invariable; θ la température variable de l'appareil; t le temps écoulé depuis l'instant où la combustion commence.

La température $d\theta$ gagnée pendant un instant infiniment petit dt, aura pour expression:

$$d\theta = (E - R(\theta - i))\,dt \text{ ou}$$

$$d\theta = (E + R(i - \theta))\,dt$$

selon que θ est $>$ ou $<$ que i.

En nommant T la durée totale de l'expérience, f et f' les températures initiale et finale de l'appareil, et en posant $t = o$ pour $\theta = f$, et $t = T$ pour $\theta = f'$, on a en intégrant.

$$RT = \text{log. hyp.} \left(\frac{E + R(i - f)}{E - R(f' - i)}\right) \quad (A).$$

La valeur constante de R se détermine aisément par une expérience spéciale. Supposons en effet qu'on ait versé dans l'appareil un poids d'eau π à une température inférieure ou supérieure à celle de l'air et qu'on le place dans les conditions où il se trouve pendant une expérience sur la combustion, à cela près que cette source de calorique se trouve supprimée. Le calorimètre alors ne s'échauffe ou ne se refroidit plus qu'aux dépens de l'air ambiant. Soit R son échauffement ou son refroidissement pour 1° d'excès de température; soient i la température de l'air, f la température initiale et f' la température finale de l'eau, t le temps et θ la température au bout de ce temps. On aura:

$$d\theta = -R\,dt(\theta - i) \text{ ou } d\theta = R\,dt\,(i - \theta)$$

selon que le est > ou < que i; et par conséquent en intégrant entre les limites f et f', on aura :

$$TR = \text{log. hyp.}\ (f - i) : (f' - i)$$

$$\text{ou}\ TR = \text{log. hyp.}\ (i - f) : (i - f') \quad (B).$$

C'est le nombre R, tiré de cette formule, qu'il faut introduire dans l'équation (A), en observant toutefois que comme, toutes choses égales d'ailleurs, l'échauffement ou le refroidissement du calorimètre est en raison inverse de son poids, il faut écrire :

$$\frac{\Pi}{P} R T = \text{log. hyp.} \left(\frac{E + \frac{\Pi}{P} R (i - f)}{E - \frac{\Pi}{P} R (f' - i)} \right) \quad (A')$$

Puisque nous avions pour poids Π dans le cas (B) et P dans le cas (A').

Puisque dans l'équation (A') nous connaissons T, f, f', i, R, P et Π, il nous suffit de la résoudre par rapport à E pour savoir à combien s'élève chaque fois l'échauffement par unité de temps dû à la combustion. En multipliant ensuite par T et P la valeur trouvée, nous avons la quantité totale développée et exprimée en calories.

L'exactitude des résultats donnés par l'équation A' dépend visiblement de l'exactitude de la loi d'échauffement que nous avons admise et de la constance E (expérimentalement parlant). Or, il va nous être facile de nous assurer qu'au cas particulier dont je parle, on avait tout lieu d'être satisfait sous ces points de vue.

Quant à ce qui concerne la loi d'échauffement :

1° J'ai répété l'expérience relative à (B) en faisant f de dix à douze degrés < ou > que i, et en faisant varier Π, et j'ai toujours trouvé pour Π R un produit sensiblement constant ; ce qui prouve que la loi admise est au moins approximative ;

2° Le produit Π' R était en moyenne seulement $0^{gr},07903$; et

par suite pour un excès de 10°, par exemple, l'appareil se refroidissait ou s'échauffait à peine de 1° par heure.

3° Or, l'expérience durait en général une heure à peine, et commençait avec un excès en moins pour se terminer par un excès en plus qu'on avait soin de faire à peu près égal au premier.

Il s'ensuit que l'appareil, qui avait d'abord reçu du calorique de l'air, lui en cédait dans la seconde période et qu'ainsi s'opérait une compensation, qui par elle-même diminuait considérablement la valeur de la correction.

Les deux dernières considérations nous font comprendre que l'emploi d'une loi de refroidissement beaucoup moins approximative que celle de Newton eût conduit à une équation équivalente à (A·) en exactitude, et à plus forte raison cette équation est-elle juste, puisque la première considération nous montre que la loi de Newton était ici très-applicable et que l'échauffement ou le refroidissement du calorimètre dans l'air était à très-peu près proportionnel aux différences de température.

Ces trois remarques réunies nous montrent clairement aussi qu'à la rigueur il n'est pas nécessaire d'avoir une source de calorique d'une égalité parfaite, pour pouvoir introduire la constante E dans l'équation A·. Cependant, pour être autant que possible à l'abri de toute cause d'incorrection, j'ai cherché à obtenir une combustion très-égale. A cet effet, la pression du gaz, une fois le bec allumé, était appréciée à 0m,000007 de hauteur de mercure près et maintenue telle à l'aide de contre-poids, qu'on posait sur le gazomètre pendant sa descente.

Comme je ne sais si le procédé, qui m'a servi à constater aussi exactement la pression d'un gaz, est généralement connu, je l'indique en note (¹).

(¹) Un petit gazomètre très-léger, cylindrique et de 0m²,01 de section était suspendu par un fil à l'une des extrémités d'un fléau de balance et équilibré à l'aide de [illegible] de l'autre extrémité du fléau.

Il me reste à parler d'une autre correction très-petite à faire encore à la formule A.

J'ai dit qu'un gazomètre aspirateur déterminait, à travers l'appareil un courant d'air qui montait par le manchon *mm' mm'* et circulait ensuite dans toute l'étendue de la spirale de plomb. Cet air entrait donc à la température ambiante et sortait avec la température que possédait l'eau à chaque instant.

Pendant la première période, il contribuait à échauffer cette eau; pendant la seconde, il lui enlevait du calorique; si les deux périodes eussent été égales en durée, il y eût eu compensation exacte. Comme il n'en était pas toujours ainsi, on évaluait le volume d'air écoulé par minute et l'on notait l'excès d'une des périodes sur l'autre.

Pour fixer les idées, soit t la durée de la première période ou le temps que l'eau met à arriver de sa température initiale à celle de l'air; soit t' la durée de la seconde période; nommons V le volume par unité de temps, C la capacité calorifique de l'air, δ sa densité, f' la température finale de l'eau, f sa température initiale, i celle de l'air; on a évidemment

$$q = V\delta C\left(\tfrac{1}{2}(f' - i)t' - \tfrac{1}{2}(f - i)t\right)$$

pour l'expression du nombre de calories que l'eau a reçu ou perdu par suite de ce courant d'air; comme V atteignait rarement $0^{m^3},017$ par minute et que δ et C sont de faibles fractions, il est clair que pour $t + t' = 60^{min}$, q n'a en toute hypothèse qu'une valeur insignifiante.

Le fléau étant horizontal, le gazomètre plongeait à moitié dans de l'eau maintenue à niveau constant dans un petit vase cylindrique aussi; au centre de ce vase s'élevait au-dessus du niveau interne de l'eau un tube, dont l'autre extrémité était en rapport avec le réservoir d'hydrogène. Il résulte de cette disposition que, pour maintenir le fléau horizontal, il fallait enlever du plateau de balance $10^{gr.}$ pour un accroissement de $0^{m.},001$ de pression du gaz évaluée en colonne d'eau. $1^{gr.}$ répondait donc à $0^{m.},0001$ ou $0^{m.},0000074$ de mercure.

En somme, nous voyons que l'exactitude et la validité du nombre que nous trouverons dans chaque expérience pour E, et parsuite pour le produit Q = E T P, dépendent principalement de l'approximation avec laquelle seront déterminés P, T, f, f' et i.

Le poids P, quoique très-considérable, était évalué à $\frac{1}{50000}$ près à l'aide de la balance-hydrostat de M. Kæppelin.

Le temps T, ou la durée totale d'une expérience, était relevé avec une montre à secondes et compté à partir du moment de l'allumage jusqu'à l'extinction du bec. Il était donc possible de connaître ce nombre à $\frac{1}{3600}$ près. Les températures i, f et f' dépendent, quant à l'exactitude de leur détermination, de l'exactitude des thermomètres eux-mêmes.

Comme on n'allumait le bec que quand les thermomètres indiquant f se trouvaient sur une division, je pense qu'une erreur de 0°,02 ne pouvait guère m'échapper. La détermination de f' ou de la température finale de l'eau exige quelques éclaircissements.

En dépit du petit volume des thermomètres plongés dans l'eau, en dépit de l'agitateur, il était impossible que les instruments ne fussent pas un peu en retard, et d'ailleurs le bec à gaz, froid au commencement, était brûlant à la fin de l'expérience, et il lui fallait un certain temps pour partager tout son excès de chaleur avec l'eau. On eût donc relevé un nombre fautif en observant à l'instant même de l'extinction du bec. Au lieu d'en agir ainsi, je notais le temps qui s'écoulait depuis le moment de l'extinction jusqu'à ce que la colonne thermométrique fût devenue immobile, et à l'aide du nombre alors relevé, j'arrivais par un calcul facile à la vraie température finale f'.

En effet, pour une très-petite modification de l'excès de température de l'appareil, on peut regarder sa vitesse de refroidissement comme uniforme ou constante, soit Θ la température *maxima* observée, on a :

$$\frac{R\,\Pi}{P}(\Theta - t')\,t = p$$

pour la perte en degrés qu'a subie l'appareil à partir de l'extinction du bec. Et l'on a par suite $\Theta + p = f$ pour la vraie valeur de f.

J'indiquerai ailleurs plus spécialement la construction du bec qui servait à brûler le gaz, et je me borne ici à parler du dosage de ce dernier. L'hydrogène, préparé avec du zinc et de l'acide sulfurique, était produit au moins 2 à 3 heures avant l'expérience ; il se trouvait recueilli et jaugé dans un gazomètre de $0^{m^2},3632$ de section, dont la course d'environ $0^{m},8$ s'appréciait à $0^{m},001$ près.

La citerne où flottait le gazomètre avait toujours, à quelques dixièmes de degré près, la température de l'appartement qui variait peu et lentement. Le gaz pouvait donc être considéré comme saturé d'eau à la température t ; B étant la hauteur du baromètre, τ la tension de la vapeur à t, Δ la densité de l'hydrogène à $0°$ et $0^{m},76$, le poids de gaz dépensé se calculait d'après la formule connue :

$$\pi = V\Delta \frac{B - \tau}{0,76\,(1 + 0,00367\,t)}$$

Après cette minutieuse exposition des procédés que j'ai employés, tant au point de vue de l'expérience que du calcul, je pense inutile de donner les détails numériques eux-mêmes de mes expériences. Les fautes que je puis avoir commises, se trouvent dans ces éléments mêmes et non dans les résultats finaux qui en déroulent ; elles seraient sans remède ou plutôt le lecteur, pas plus que moi, ne pourrait les apercevoir.

Je me borne donc à dire que le nombre que j'ai trouvé comme exprimant la chaleur développée par la combustion d'un gramme d'hydrogène dans l'air, est de $34^{c},33$. Il ne diffère, comme on voit, que de $0^{c},11$ de celui de MM. Silbermann et Favre. La petite différence indiquée peut provenir de ce que pendant la combustion une très-petite quantité d'hydrogène se combine avec l'azote pour former de l'ammoniaque et puis du nitrate ammonique. Une concordance aussi rapprochée entre deux nombres, trouvés par des méthodes en somme très-différentes, est une confirmation des plus frappantes de leur approximation. Et nous pouvons conclure que

l'hydrogène, brûlant dans l'air, donne à bien peu près la même chaleur qu'en brûlant dans l'oxigène pur.

J'étais donc autorisé à employer le chiffre de MM. Silbermann et Favre, pour la graduation de notre calorimètre à chaleur humaine.

La lumière est-elle du calorique visible, le calorique est-il de la lumière invisible? Ou bien existe-t-il entre la lumière et le calorique une différence dans leur nature intime?

Notre calorimètre est, comme nous avons vu, parfaitement diaphane; il laisse paraître à l'extérieur le moindre phénomène de lumière, qui se produit dans l'intérieur du cylindre *m m' m m'*.

Supposons, que tantôt nous laissions échapper librement toute la lumière produite dans ce manchon par la combinaison d'un corps avec l'oxigène; que tantôt par un moyen convenable nous empêchions au contraire cette lumière de sortir de l'appareil; bien plus, que dans un autre cas nous empêchions cette lumière de se développer, sans diminuer pour cela l'activité du phénomène chimique.

Que conclurions-nous si, dans le premier cas, l'eau s'échauffait moins, toutes choses égales d'ailleurs, que dans les deux autres cas? Que conclurions-nous, au contraire, si dans les trois cas le nombre de calories développé par gramme de combustible était rigoureusement constant? La première question comporte deux réponses également valables; la seconde n'en comporte absolument qu'une. En effet, la première supposition semble d'abord prouver que la lumière échauffe l'eau, puisque l'on recueille moins de calories, quand on la laisse échapper que quand on l'absorbe dans l'appareil même. Mais cette déduction n'aurait rien de rigoureux puisqu'on pourrait avec raison objecter qu'une partie du calorique rayonnant, qui se développe par la combustion, a pu avec la lumière s'échapper de l'appareil. La question posée en tête de ce paragraphe resterait donc indécise.

Que si, au contraire, le nombre de calories recueilli est invariable, il n'y a qu'une réponse à faire. La lumière est autre chose que le calorique, même rayonnant.

On voit maintenant quel problème élevé je pouvais espérer résoudre avec notre calorimètre diaphane. On voit aussi pourquoi j'ai été obligé de donner à cet instrument des dimensions aussi insolites. Les expériences si remarquables de Melloni ont prouvé que le verre, le sel gemme et beaucoup d'autres corps se laissent traverser par le calorique rayonnant sans l'absorber, tandis que d'autres corps, quoique translucides, absorbent au contraire le calorique rayonnant provenant de certaines sources. L'eau est précisément dans ce cas par rapport au calorique de nos lampes quelconques: mais encore faut-il qu'elle soit en couche d'une certaine épaisseur, dépendant de l'intensité de la source calorifique. Afin d'être à l'abri de toute crainte au sujet d'une dispersion de calorique à travers l'eau de l'appareil, et afin de rendre l'expérience décisive, j'ai donné à la couche de liquide $0^{m\cdot},15$ d'épaisseur *minima*, ce qui était très-considérable, comparativement aux épaisseurs sur lesquelles avait opéré Melloni.

Lumière éclatante développée dans le cylindre m m′ m m′ et dispersée dans l'appartement.

1° Le bec à gaz, dont la figure indique d'ailleurs suffisamment la forme générale, était en porcelaine; l'hydrogène s'échappait par 40 trous, percés dans la platine circulaire horizontale, et sa flamme, en s'élevant dans la cheminée en verre, traversait le réseau en platine *v v* qu'elle rendait assez lumineux pour éblouir l'œil en plein jour. La platine en métal brillant *p p*, placée au bas du bec, réfléchissait la lumière qui aurait pu se disperser avec le calorique rayonnant par l'ouverture inférieure du cylindre en cristal.

2° Au lieu d'un bec à hydrogène on employait une lampe à huile minérale, dont la figure indique la forme; le combustible brûlé dans cette lampe, résultait de la distillation d'une huile de pétrole de fort belle qualité, et dont on ne recueillait que le premier huitième environ. Ce produit, très-fluide, de 0,78 de densité, d'une odeur éthérée peu agréable, était formé d'un mélange de carbures d'hydrogène divers. La flamme de ce bec donnait une lumière blanche admirable, dont l'intensité était égale à celle de 15 bougies stéariques ordinaires de 10 au kilogr.

Lumière non dispersée dans l'appartement et absorbée dans l'appareil même.

Le cylindre *m m' m m'* pouvait être enveloppé complètement d'un manchon en tôle noirci à l'intérieur.

Dans ce cas, il est clair que nulle apparence de lumière ne pouvait se montrer au-dehors et que de plus la lumière ne pouvait être absorbée *qu'au profit de l'appareil*, puisque cette tôle était immergée dans l'eau même.

Lumière non développée.

On sait que l'hydrogène par lui-même ne donne qu'une flamme très-pâle. Il suffisait en effet d'enlever le réseau métallique *v v* pour rendre cette flamme absolument invisible de jour. Dans cet état de choses, d'ailleurs, le manchon restait en place pour arrêter la pâle lumière dégagée.

Ces trois manières d'opérer étaient assez destinctes ; la lumière dispersée ou retenue dans les deux premiers cas était assez intense pour qu'aucun doute, aucune équivoque ne restât sur les résultats finaux, quels qu'ils fussent.

D'après les effets mécaniques produits au sein même de l'appareil, il était facile de voir combien le mode de production du calorique se trouvait changé chaque fois. Lorsque la flamme de l'hydrogène ne traversait point le réseau métallique, le serpentin de plomb s'échauffait à son origine ; l'eau qui le léchait était sillonnée de stries produites par l'inégal pouvoir réfringent des parties plus ou moins chaudes.

Dès que le platine était en place, ces stries diminuaient considérablement et il s'en produisait autour du verre *m m' m m'*. Et lorsque le manchon en tôle était mis en place, c'est autour de lui que se formaient le plus de stries.

Dans le premier cas, la plus grande partie du calorique était emportée d'abord par l'air et se communiquait ensuite à l'eau par la spirale. Dans les deux autres cas, il se développait au contraire

beaucoup de calorique rayonnant, et l'air n'emportait qu'une faible fraction de la chaleur totale produite. C'est au surplus ce qu'il est facile de constater directement par une autre voie : qu'à quelque distance au-dessus de la cheminée d'un bec à gaz hydrogène on suspende un thermomètre : celui-ci montera par exemple à 350°, lorsque le gaz brûlera librement ; dès que la flamme traversera le réseau de platine, il tombera au-dessous de 100° ; le platine, s'emparant d'abord du calorique par son contact avec la flamme, le disperse ensuite sous forme rayonnante et de fait le courant ascendant se trouve ainsi refroidi.

Quoiqu'il en soit maintenant, mes expériences me semblent trancher d'une manière décisive les deux questions contradictoires qui forment le titre de cette partie du chapitre.

De quelque manière que s'opérât la combustion de l'hydrogène, qu'elle se fît avec ou sans réseau de platine, avec ou sans manchon de tôle, la moyenne de plus de 5 expériences chaque fois était le nombre 34c,35 par gramme de gaz ; et j'ajoute ici que les chiffres qui constituaient cette moyenne ne variaient que par la dernière décimale de droite. De quelque manière qu'on opérât avec l'huile minérale, qu'on laissât sa lumière éclatante se répandre hors du calorimètre, ou qu'on l'y arrêtât avec la tôle, le nombre de calories par gramme était de 11c,1.

La lumière ne possède donc aucune propriété calorifique.

La lumière est autre chose que du calorique rayonnant visible. Et le calorique est autre chose que de la lumière non perceptible par la rétine.

Il se peut qu'un être vivant voie là où un autre ne voit pas encore ou ne voit plus. Il se peut qu'il y ait des *sons* lumineux trop graves ou trop aigus pour être perçus par l'œil. Mais en tous cas, ce que la rétine perçoit comme lumière est autre chose que ce qui nous donne l'impression de chaud par l'intermédiaire des nerfs du tact.

Que la théorie des ondulations soit juste ou fausse, absolument

parlant, elle est en tous cas aujourd'hui la seule acceptée des deux théories que l'esprit humain a su concevoir.

Melloni a démontré surabondamment l'analogie et même l'identité du mode de propagation du calorique rayonnant et de la lumière. Mais qu'on le remarque bien maintenant : plus cette identité de mouvement sera mise en évidence, mieux aussi il sera prouvé :

Que l'ondulation luminique se fait dans un milieu autre que l'ondulation calorifique.

Ces deux mouvements vibratoires, complètement identiques si l'on veut, peuvent coexister ou ne pas coexister. L'éther lumineux, en un mot, est autre chose que l'éther calorifique, bien qu'ils soient partout répandus tous deux soit également, soit inégalement.

Les causes qui font vibrer l'un font en général vibrer l'autre : mais ce fait ne saurait être désormais regardé comme une vérité absolument nécessaire. De plus, nous voyons que les deux mouvements peuvent être arrêtés l'un indépendamment de l'autre.

L'œil placé vis-à-vis de notre calorimètre signalait la lumière la plus vive là où le thermoscope le plus sensible fût resté à 0°. La plaque daguerrienne l'eût signalé aussi ; d'un autre côté un verre noir laisse passer librement le calorique rayonnant, tandis qu'il intercepte la lumière pour l'œil et pour le papier photographique le plus sensible.

On ne saurait trop insister sur cette conclusion, qui est fondée :

Mieux on établira l'identité des mouvements de propagation de la lumière et du calorique, mieux on démontrera la diversité des principes naturels dans lesquels ils s'opèrent, et, soit dit en terminant, mieux aussi on prouvera la nécessité d'admettre l'existence de ces principes si différents de la matière pondérable, de ces éthers que déjà quelques physiciens commencent à traiter des mythes et des rêves de notre imagination.

CHAPITRE IX.

RAPPORT LU PAR M. *CLAUSIUS*, A LA SOCIÉTÉ DE PHYSIQUE DE BERLIN, SUR LE MÉMOIRE ENVOYÉ AU CONCOURS ET AYANT POUR TITRE : RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Le mémoire se divise en deux parties très-distinctes. La première contient les recherches expérimentales et leur discussion. La seconde, qui a pour titre « Conclusions générales », renferme des considérations philosophiques, ayant à la vérité pour point de départ les résultats de l'expérimentation et s'y rattachant, mais s'écartant néanmoins de la question posée par la société de physique. L'auteur le juge aussi, quand au commencement de cette seconde division ; il dit que, par sa nature même, cette dernière partie de son travail ne peut aucunement figurer parmi les pièces soumises au concours. D'après cela, je crois donc pouvoir me borner à l'examen de la première partie, destinée plus particulièrement à concourir.

Cette partie, toute d'expérimentation, consiste en quatre séries d'expériences ; les deux premières séries se lient si étroitement qu'il conviendra de les confondre dans la même analyse.

PREMIÈRE SÉRIE D'EXPÉRIENCES.

Développement de la chaleur par le frottement.

Un tambour en fonte, parfaitement cylindrique, poli à sa surface externe et pouvant tourner sur son axe horizontal, était recouvert

à sa moitié supérieure d'un coussinet métallique, de telle sorte que lorsque le tambour tournait, il se produisait un frottement contre le coussinet. Entre les deux surfaces frottantes, se trouvait un intermédiaire lubrifiant, consistant en différentes sortes de graisse.

La force consommée par le frottement était évaluée aussi exactement qu'avec le frein de Prony, au moyen du poids qu'on suspendait à l'extrémité d'un levier, afin d'empêcher le coussinet d'être entraîné par le mouvement du tambour.

Pour mesurer la chaleur développée par le frottement, on s'y prenait de trois manières différentes.

Dans le premier procédé, un courant régulier d'eau froide entrait par l'une des extrémités du tambour, y enlevait la chaleur produite, et s'en écoulait par l'autre extrémité. Dans le second procédé, le tambour renfermait un poids connu d'eau froide, dont le frottement élevait la température d'un certain nombre déterminé de degrés. Enfin, dans la troisième, le tambour était rempli d'eau chaude, et l'expérience prolongée jusqu'à ce que la température en fût devenue parfaitement constante, de telle sorte que les pertes de calorique par les parois externes étaient parfaitement égales à la quantité de chaleur produite par le frottement.

Ces trois procédés ont été chacun expérimentés un grand nombre de fois, de manière à fournir finalement, pour l'équivalent mécanique, trente-deux valeurs qui s'accordent bien ensemble, puisque les nombres extrêmes en sont 359$^{k.m.}$ et 382$^{k.m.}$. La moyenne, exprimée en kil. mètres par unité de chaleur, s'élève à 371$^{k.m.}$,6.

DEUXIÈME SÉRIE D'EXPÉRIENCES.

Développement de la chaleur par la désagrégation des corps.

Des morceaux de différents métaux, pourvus chacun à l'avance d'un trou cylindrique, étaient placés dans un calorimètre où il se trouvaient ensuite forés. La pièce métallique, soumise à l'action d'un foret vertical, pouvait pivoter autour d'un axe vertical aussi faisant suite à celui du foret ; elle était retenue à l'aide d'un levier

horizontal, dont l'extrémité était tirée par une ficelle passant par-dessus des poulies convenablement disposées de manière à ce qu'on pût *peser l'effort* nécessaire pour maintenir le levier. La force consommée par le forage se trouvait ainsi exactement évaluée.

L'auteur n'indique pas séparément les divers résultats de cette série d'expériences; il n'en donne que la moyenne qui est de 425$^{k.m.}$.

Cette valeur ne s'accorde pas avec celle qu'avait fournie la première série. L'auteur en donne pour raison la production durant le forage d'un son intense qui au contraire n'accompagnait pas le frottement. Comme cependant cette raison ne suffit point pour expliquer complètement la différence trouvée, l'auteur penche à croire qu'elle provient de la nature même des phénomènes, la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur n'étant pas, selon lui, constante, mais dépendant du mode de procédé employé.

Je crois néanmoins que, sans mettre en doute l'exactitude des observations, on n'est pas obligé d'admettre cette dernière conclusion; car les expériences ont pu s'accompagner encore d'autres circonstances, dont l'auteur n'aura pas tenu compte, et qui expliqueraient probablement la différence trouvée.

D'abord, dans la première série d'expériences, il n'a pas fait attention que l'eau renfermée dans le tambour était sans cesse mise en mouvement, et que cela même devait aussi contribuer un peu à en élever la température. Mais cette quantité de calorique, insignifiante en elle-même, ne pouvait agir d'une manière sensible que dans le troisième procédé de la première série, dans lequel elle concourait à diminuer la valeur de l'équivalent mécanique. Or ce sont les résultats obtenus par ce troisième procédé, qui appliqués aux deux précédents ont servi à y évaluer les pertes externes de calorique subies par l'appareil. De cette manière, la quantité de chaleur a été encore une fois introduite en sens inverse dans les formules, et s'est ainsi trouvée annulée d'elle-même dans le résultat final.

Mais en outre il importe de mentionner un autre fait essentiel.

Pour déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur, une condition capitale est à remplir. Les corps soumis à l'expérience ne doivent subir aucune altération dans leur état ; ou, s'il s'en produit une, le travail qu'elle représente doit être exactement évalué. Cette condition n'a pas été entièrement remplie pour les recherches qui nous occupent.

Dans la seconde série d'expériences, il est évident que la séparation des parties métalliques à l'aide du foret a consommé un certain travail ; et qu'ainsi la somme totale de force motrice dépensée n'a pas été employée à produire de la chaleur. Le travail comparé au calorique est donc trop grand, et le rapport 425 doit par conséquent être considéré comme trop élevé aussi.

Dans la première série d'expériences, les parties de l'appareil n'ont à la vérité subi aucune altération essentielle ; mais, comme il a été déjà dit, le frottement des surfaces métalliques n'était pas immédiat ; il se trouvait entre elles un intermédiaire lubrifiant, et celui-ci a dû nécessairement se modifier dans son état constitutif, pendant l'expérience. Quelle qu'ait été cette modification, il est clair qu'on ne peut regarder comme très-concluantes, ni invoquer contre le principe général de l'équivalence du travail et de la chaleur, des expériences où le corps subissant le principal frottement a éprouvé des altérations dont on n'a pu exactement tenir compte.

Sans exagérer la valeur de cette explication, je veux seulement citer un cas qui a pu se présenter. Je suppose que, par suite de la chaleur et du frottement, il s'opère dans la graisse une réaction chimique capable de développer du calorique ; une portion de la somme totale du calorique mesuré ne serait alors point due immédiatement au travail mesuré ; et si, avant d'établir le rapport, on eût soustrait cette portion de calorique de la quantité totale, la valeur de l'équivalent mécanique se serait élevée au-dessus de 371k m,6.

Plusieurs phénomènes, rapportés plus loin par l'auteur lui-même, prouvent que ce genre d'altération peut se produire dans la graisse.

Avec l'appareil de la première série d'expériences, il a aussi fait quelques essais dans lesquels les surfaces métalliques, n'étant point séparées par un corps gras, étaient en contact immédiat. En raison de l'inégalité du frottement, la détermination du travail devenait alors très-difficile; cependant l'auteur dit s'être convaincu que, dans ces essais, la valeur de l'équivalent mécanique s'était élevée au-dessus de $371^{k.m.},6$, pour se rapprocher des nombres 410 à $420^{k.m.}$.

Il a de même observé que si l'on renouvelait la graisse entre les surfaces métalliques, le frottement, loin de diminuer aussitôt, s'accroissait d'abord, et ne s'affaiblissait que peu à peu jusqu'au degré auquel il restait ensuite long-temps stationnaire. Déterminait-on l'équivalent mécanique avant que ce dernier terme ne fût atteint, toujours on obtenait des valeurs supérieures à $371^{k.m.},6$, et convergeant vers un nombre au moins égal à 400.

Toutes ces raisons me semblent autoriser à conclure que la différence existant entre les résultats de la première et ceux de la deuxième série d'expériences, ne repose que sur des circonstances accessoires; et qu'on peut admettre comme moyenne fournie par ces recherches, un nombre qui se trouve entre les deux chiffres extrêmes obtenus, c'est-à-dire probablement un peu au-dessus de 400. Ce résultat s'accorde assez avec la valeur trouvée pour le frottement par M. Joule, et qui est de $423^{k.m.},55$.

TROISIÈME SÉRIE D'EXPÉRIENCES.

Consommation du calorique dans la machine à vapeur.

Dans ces expériences, que je regarde comme les plus importantes, on a évalué la chaleur qu'il fallait communiquer à la vapeur pour l'amener à l'état dans lequel elle se rend aux cylindres, et celle qu'elle cède ensuite à l'eau de condensation. La différence trouvée a été comparée avec le travail produit.

Des expériences de ce genre sont d'une difficulté extraordinaire, surtout quand on les exécute comme l'auteur, sur des machines

de la force de plus de cent chevaux. Il dit avec beaucoup de raison que les expériences faites sur de semblables machines sont bien différentes de celles qu'on fait à l'aide d'un appareil de physique; dans ces dernières, l'opérateur peut varier à son gré les phénomènes et les produire à temps voulu; tandis que dans les premières, tout se passe plus à la manière des phénomènes naturels, qu'il faut observer comme et quand ils se présentent, et dont il faut, pour ainsi dire, saisir au vol toutes les particularités.

L'auteur a su vaincre en grande partie ces difficultés, par la disposition convenable et habile de ses procédés, et les soins apportés dans leur exécution; il ne s'est pas limité au mode réglé de marche d'une machine, mais en a fait varier de plusieurs manières les conditions de travail.

Il a fait ses essais sur deux machines, l'une à un seul cylindre, et l'autre, du système Woolf, à deux cylindres, où la vapeur, après avoir agi en pleine pression sur le piston du petit cylindre, allait agir par détente sur le piston du grand.

Les deux machines marchaient tantôt à l'aide de vapeur saturée, tantôt à l'aide de vapeur surchauffée à 230 degrés environ. Les cylindres de la machine Woolf étaient pourvus d'une enveloppe remplie, soit d'air, soit de vapeur saturée ou surchauffée.

Il serait trop long d'entrer dans les détails de ces expériences, et je dirai seulement qu'elles ont fourni beaucoup de résultats, aussi intéressants en eux-mêmes qu'importants quant aux fonctions de la machine à vapeur. Une des données qui touche de plus près au problème posé, c'est que la vapeur, après avoir fourni du travail dans les cylindres, rend à l'eau de condensation moins de chaleur qu'elle n'en avait reçu dans la chaudière, toute déduction faite des pertes accessoires qu'elle a pu subir en route. Ce fait qui à la vérité était nécessaire théoriquement, mais sans encore avoir été, à ma connaissance du moins, prouvé par aucune expérience, est ici mis hors de doute.

Le travail fourni par la machine pendant la durée des essais était déterminé, tant à l'aide du frein de Prony, qu'avec l'indicateur

de Watt. Des recherches spéciales ont été faites pour évaluer la force disponible de la vapeur dans les cylindres.

En comparant le travail produit avec la chaleur dépensée, l'auteur est tombé dans une singulière et manifeste erreur. Il admet que le travail seul fourni par l'expansion coûte du calorique; et par suite il calcule l'équivalent mécanique, en divisant cette partie du travail total par la quantité totale du calorique disparu. Il s'en suit tout naturellement que les nombres obtenus devaient être trop petits et varier beaucoup, le rapport entre le travail dû à la détente et le travail total n'ayant pas été le même toujours.

Ce qui prouve que cette manière de voir est en opposition complète avec la théorie mécanique de la chaleur, c'est qu'elle conduit ainsi à admettre que, dans une machine à vapeur sans détente, le travail est produit sans consommation de chaleur.

Il est facile de montrer comment l'auteur est tombé dans cette erreur. Pour justifier son point de départ, il dit que lorsque la vapeur se condense à la pression sous laquelle elle s'est formée, elle rend autant de calorique qu'il en avait fallu dépenser pour la produire. Cet énoncé est tout-à-fait juste, mais ne trouve pas son application dans la machine à vapeur.

Quand, dans une machine sans détente, la vapeur a complètement rempli le cylindre d'un côté du piston, et qu'elle se trouve ensuite mise en rapport avec le condenseur, la première portion seule de cette vapeur s'y précipite sous la pression initiale; puis la tension diminue de plus en plus. L'expansion qu'éprouve la vapeur dans le cylindre détermine un refroidissement tel que si elle n'est point surchauffée, ou ne reçoit point de chaleur, une portion s'y condense déjà. Pour que la condition formelle de l'énoncé ci-dessus pût être remplie, il faudrait que le piston avançât assez rapidement pour maintenir dans le cylindre la pression initiale. Mais, dans ce cas, la contre-pression qu'il aurait à surmonter serait précisément égale à la pression le poussant en avant, et l'on ne pourrait recueillir aucun travail externe. Si l'auteur avait étendu ses recherches à une machine sans détente, il eût sans doute

trouvé aussi que la quantité de calorique s'échappant avec l'eau de condensation est moindre que celle qu'on dépense à produire la vapeur.

J'ai essayé d'éliminer des résultats cette erreur, ce qui, il est vrai, n'a pu se faire que très-imparfaitement.

Bien que l'attention principale de l'auteur ne se soit portée que sur le travail produit par la détente de la vapeur, néanmoins il indique en chevaux le travail total fourni par la machine dans chaque expérience. Ces chiffres toutefois représentent le travail effectif, relevé au frein de Prony, et par conséquent diminué déjà du travail consommé par les frottemems de la machine ; tandis que, pour le calcul, il faudrait connaitre tout le travail disponible de la vapeur dans le cylindre. L'auteur a fait, sur la machine à un seul cylindre, des expériences où il a pu calculer le travail total disponible, et le comparer avec le travail effectif relevé au frein; et il a trouvé ainsi que ce dernier s'élève à 0,70 ou 0,75 du premier. Ensuite il a continué, sur la machine Woolf, des essais de même nature, à l'aide de l'indicateur de Watt, qui, ainsi qu'il l'a fait remarquer ailleurs, consommait accidentellement un frottement proportionnel à celui de la machine elle-même, de sorte que les résultats donnés par l'indicateur sont pareils à ceux du frein. Ces expériences montrent aussi que la machine rendait environ 0,70 à 0,75 de la force disponible.

A l'aide des chiffres fournis par l'auteur pour le travail effectif, j'ai donc calculé le travail disponible, en multipliant ces nombres par les coefficients 0,70 et 0,75 ; et j'ai fait, avec les quantités de travail ainsi déterminées, le calcul que l'auteur avait fait sur le travail seul donné par l'expansion. Les résultats en sont indiqués dans le petit tableau suivant, en regard de ceux de l'auteur.

Équivalent mécanique de la chaleur.

D'APRÈS L'AUTEUR.	CALCULÉ D'APRÈS LE TRAVAIL TOTAL DISPONIBLE, A L'AIDE DU COEFFICIENT.	
	70 p. %.	75 p. %.
151	333	340
126	380	355
177	439	410
159	394	368
204	486	454
173	427	398
275	651	608
120	321	300
185	415	388
Moyennes..............	427	399

Moyenne commune ....413.

On voit que cette dernière moyenne s'accorde très-bien avec les nombres trouvés par M. Joule pour le frottement, et avec ceux qui ressortent des expériences de l'auteur lui-même.

Parmi les valeurs isolées, quelques-unes, il est vrai, s'éloignent notablement de cette moyenne. Cette différence peut provenir en partie de ce que j'ai dû employer des nombres indiqués en passant seulement par l'auteur, et qui en conséquence ont été déterminés avec moins d'exactitude que ceux dont il avait besoin, pour ses

propres calculs. S'il soumettait à un calcul analogue au mien les matériaux complets de ses observations, peut-être serait-il conduit à éliminer encore quelques incorrections, et les chiffres s'accorderaient-ils mieux alors. Même acceptés tels quels, ils me semblent d'une grande valeur scientifique. Ces écarts des nombres isolés par rapport à leur moyenne ne surprendront plus, si l'on songe aux difficultés de recherches semblables, ainsi qu'au grand nombre de circonstances éventuelles dont elles dépendent, et dont on ne peut pas toujours exactement tenir compte; et si l'on considère en outre que les nombres isolés n'ont pas été obtenus à l'aide d'un même procédé, mais que ces neuf chiffres sont le produit de six modes particuliers, selon lesquels fonctionnaient, dans des conditions de travail très-distinctes, deux machines de système entièrement différent, ensorte que presque à chaque nouvelle expérience intervenaient d'autres causes d'erreur.

L'ensemble de ces résultats me paraît une belle confirmation des travaux de M. Joule, en même temps que le complément essentiel de toutes les observations faites jusqu'ici; parce que cette détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur est la première obtenue à l'aide d'une expérience où l'on ait converti non la force en chaleur, mais la chaleur en force; et où le corps soumis à l'expérimentation soit revenu à son état primitif. En outre, ces résultats gagnent encore en intérêt, quand on sait qu'ils sont dus à des expériences faites précisément sur la machine, la plus employée dans la pratique, pour la production de la force motrice à l'aide du calorique; machine qui, dans l'application de la théorie mécanique de la chaleur, garde ainsi l'importance du rang auquel elle s'était placée déjà, en servant à la démonstration de la théorie de Carnot.

QUATRIÈME SÉRIE D'EXPÉRIENCES.

Consommation du calorique dans le corps humain.

Dans cette série d'expériences, l'auteur a cherché, sur lui-même et sur d'autres sujets, comment varient les quantités d'acide carbonique exhalé et de calorique développé, quand le corps, au lieu de se tenir à l'état de repos, est soumis à un certain travail régulier.

Il a constaté que durant le travail ces deux quantités s'accroissent, mais non proportionnellement. La quantité de calorique développée est moindre que celle d'acide carbonique exhalée; et il faut donc qu'une partie de la chaleur produite par la combinaison chimique soit consommée ailleurs. Admettant que la perte de calorique doit être égale à la production de travail, l'auteur a déterminé ainsi l'équivalent mécanique de la chaleur.

Si intéressantes que puissent être ces expériences considérées en elles-mêmes, et si importants que soient pour la physiologie les résultats qui en ressortent accessoirement, elles ne me paraissent néanmoins d'aucune utilité réelle pour la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Le corps animal a quelques propriétés qui s'opposent à une rigoureuse appréciation de ce genre; je n'en veux citer qu'une. La première condition requise d'une machine qui doit servir à des expériences semblables, c'est que la machine ne subisse point dans son état des modifications définitives, ou du moins aucune qui ne soit connue et par conséquent appréciable. Telles sont, par exemple, celles qui se manifestent dans la machine à vapeur où l'eau revient périodiquement à l'état primitif qu'elle avait quitté. En ajoutant constamment dans la chaudière, et en soustrayant du condenseur la chaleur nécessaire à ces transformations de l'eau, on peut à volonté laisser travailler la machine. Mais pour le corps animal, ce n'est point là le cas. Après un certain temps de travail, il est épuisé et a besoin de repos; et, dans l'état actuel de la science, il serait difficile de déterminer d'une manière précise la modification qui est survenue, et qui l'a mis dans ces conditions d'épuisement.

Une importante source d'erreurs me paraît en outre devoir exister dans les recherches de l'auteur. En cherchant la détermination de la chaleur, il n'a eu égard qu'au calorique rayonné par la périphérie externe du corps ou cédé au contact de l'air ambiant, et qu'à la chaleur sortant des poumons, par suite de l'évaporation de l'eau et de la température en excès communiquée à l'air respiré. Mais de plus, le corps exhale de la vapeur d'eau par toute sa surface externe, ce qui occasionne une déperdition de chaleur; et cette évaporation,

qui n'est pas constante, dépend du degré d'humidité présenté par la peau. Comme il est bien à supposer que les personnes sur lesquelles se faisait l'expérience entraient plus ou moins en sueur, ou du moins en moiteur, par le fait seul de se trouver renfermées dans un espace étroit, soumises à un mode particulier de respiration à travers des tuyaux, assujéties à un travail inaccoutumé et pénible, on en peut aussi conclure que la perte de calorique déterminée par l'évaporation devait être plus considérable à l'état de travail qu'à celui de repos. Cette circonstance ayant été négligée dans le calcul, la chaleur perdue par l'évaporation a été ajoutée à celle qui avait été consommée par le travail. En raison de celui-ci, la quantité de chaleur se trouvait ainsi beaucoup trop grande, et, par suite, la valeur de l'équivalent devait être trop petite.

Il est possible que cette dernière raison suffise seule pour rendre compte de l'importante différence existant entre l'équivalent ainsi déterminé et les chiffres fournis par les autres expériences. En tout cas, on ne peut tirer de ces recherches aucune conclusion contre la théorie mécanique de la chaleur.

A la partie expérimentale que nous venons d'analyser, s'en trouve jointe une autre plus philosophique, où l'auteur est conduit à admettre que, pour le travail de la machine à vapeur et celui du corps humain, la valeur de l'équivalent mécanique est différente pour le travail dépensé en frottement. Je ne puis me dire en tout point d'accord avec les considérations présentées dans cette partie. Mais l'auteur ne l'ayant point destinée au concours, et ne l'ayant envoyée que parce qu'elle fait suite au commencement du mémoire, je crois pouvoir la laisser en dehors du jugement porté sur le reste du travail.

Pour la conclusion de mon analyse, je me permets de faire à la commission la proposition suivante. Parmi les résultats importants obtenus par l'auteur, plusieurs ne pouvant être regardés comme exacts, et les divergences ne provenant pas de circonstances accidentelles, mais dépendant en partie d'une fausse appréciation des faits, la commission ne croit pas pouvoir couronner le travail. Cependant, comme elle reconnaît que ces recherches, considérées en

elles-mêmes, ont fourni de nombreux résultats, qui, même dans les cas où l'auteur n'en a pas tiré les conclusions finales exactes, contribuent néanmoins essentiellement à la solution de la question posée, sont pour la science des conquêtes précieuses, n'ont pu être obtenus qu'à l'aide d'une grande habileté et moyennant beaucoup de soin dans la poursuite des expériences, ont coûté beaucoup de temps et occasionné beaucoup de frais, la commission propose d'accorder à l'auteur les 250 thalers d'or destinés au prix ; et en même temps elle exprime le vœu qu'il reprenne encore une fois la question, pour calculer, d'après les principes exacts de la théorie mécanique de la chaleur, le résultat final de ses observations, les complétant, s'il le juge à propos, par des nouvelles recherches ; tâche que ses travaux précédents lui rendront plus facile qu'à tout autre observateur.

Signé : R. CLAUSIUS.

Zurich, le 22 mars 1857.

En considération de ce qui précède, la commission soussignée fait savoir à la Société de physique quelle adopte, de tout point, la proposition de Monsieur le rapporteur, et en arrête l'exécution.

Ont signé :

MM. DU BOIS-REYMOND,
CLAUSIUS,
WILHELMY.

Berlin, le 10 juillet 1857.

RÉFLEXIONS SUR LE RAPPORT PRÉCÉDENT,

faites au point de vue de l'expérience.

Le rapport qu'on vient de lire ne concerne, comme on a pu voir, que les cinq premiers chapitres, qui seuls ont fait réellement partie des pièces du concours, et que j'ai à dessein laissés à l'impression, *tels quels;* avec leurs lacunes, leurs imperfections et même leurs fautes. Les chapitres VI, VII et VIII n'ont pu être envoyés à la Société de physique qu'après l'expiration du terme indiqué, pour la réception des ouvrages du concours, et d'après les dates, ils n'ont pu être soumis au jugement de M. Clausius. A plus forte raison en est-il ainsi du chapitre suivant, que je n'ai terminé que récemment. J'ai tout lieu de regretter ce contre-temps, et j'ai cru de mon devoir de le signaler, afin de mettre entièrement à couvert la responsabilité du rapporteur. En effet, plusieurs des objections critiques très-fondées, que l'on peut faire à mes conclusions, quant aux expériences décrites en premier lieu, sont levées, soit par les faits, soit par la discussion dans les chapitres VI et VII. C'est ce que je vais essayer de montrer très-brièvement :

1° En ce qui concerne les expériences sur le frottement, M. Clausius analyse très-bien la nature des erreurs qu'a pu amener le frottement de l'eau dans le tambour métallique. Il montre que cette source d'erreur s'éliminait en grande partie d'elle-même, dans l'emploi des formules de correction. J'aurais dû fournir de suite les éléments nécessaires pour apprécier l'erreur, en disant que la force consommée par le frottement de l'eau, *et non mesurée*, ne s'élevait pas au millième de la force consommée par le frottement du coussinet, et qu'ainsi l'équivalent, dans les cas les plus défavorables, n'a pu être troublé que de 0,001^{m}.

Dans les expériences décrites au chapitre VI, le faible diamètre du tourillon traversé par l'eau réduit l'erreur possible à un infiniment petit.

2° M. Clausius dit avec raison que, pour calculer l'équivalent mécanique, il faut tenir compte des altérations que peuvent subir les matières employées, et que dans les frottements médiats l'altération chimique de la graisse, sa combustion partielle, a pu être une source de chaleur que j'ai négligé d'évaluer. J'aurais dû ici encore fournir les éléments disponibles du calcul de correction en faisant remarquer : que le tambour était graissé une fois pour toutes avant que l'expérience proprement dite ne commençât ; qu'il pouvait, avec la même huile, supposée de bonne qualité et s'élevant à deux grammes, tourner près de trois heures, sans que le frottement s'accrût sensiblement ; que l'expérience durait environ une demi-heure, et qu'en toute hypothèse on ne recueillait ainsi que le sixième du calorique fourni par l'altération de l'huile. En partant de ces données et supposant même complète la combustion de la moitié de l'huile, ce qui est inadmissible, on n'arrive qu'à une erreur en plus de 2 ou 3 calories sur celles qu'on attribue au frottement.

En tous cas, par les modifications complètes introduites dans la méthode d'expériences, cette source d'erreur ne peut plus être invoquée, pour expliquer les variations de l'équivalent indiquées dans le tableau du chapitre VI.

3° Les expériences sur la chaleur humaine, décrites dans le chapitre VII, me semblent confirmer non-seulement l'exactitude de celles du chapitre IV, mais encore la validité des conclusions que j'ai tirées des phénomènes que présente le moteur animé. Dans la description du procédé calorimétrique employé pour les premières expériences déjà, j'ai eu le tort très-grave de ne pas aller au-devant de quelques objections qu'on pouvait y faire, et que je m'étais faites moi-même dès l'abord. Cette lacune a été remplie, je pense, assez complètement dans le septième chapitre, et je ne m'arrête ici un moment qu'à l'une des critiques principales.

Il peut sembler au premier abord que la chaleur enlevée au corps humain par la transpiration et par la sueur, inévitable dans un travail un peu forcé, n'a point été mesurée dans mes recherches ; il n'en est pourtant pas ainsi en réalité.

Qu'on se rappelle, en effet, que la chambrette calorimétrique a été, en quelque sorte, graduée ou *titrée calorifiquement*, en y faisant brûler en un temps donné un volume connu d'hydrogène, et en déterminant l'excès de la température interne sur la température externe, nécessaire pour que les pertes par les parois fissent équilibre au calorique produit dans l'intérieur, et que la personne soumise à l'expérience n'a fait que remplacer ce foyer de chaleur. Deux cas pouvaient se présenter pendant l'expérience, et se sont présentés en effet : 1° Ou bien la personne ne transpirait que de manière à saturer sans cesse d'eau l'air de la chambrette, et alors cette vapeur d'eau allait céder son calorique latent aux parois, absolument comme il en arrivait pendant la combustion de l'hydrogène, et la quantité cédée se trouvait mesurée implicitement par l'emploi de la loi de refroidissement, appliqué à l'appareil ; 2° Ou bien la personne suait, se couvrait de vapeur exhalée abondamment et condensée sur la peau, et alors par le fait même de cette condensation, le calorique latent était cédé à l'air, allait s'échapper par les parois, et était encore évalué *implicitement* par l'emploi de la loi de refroidissement, déterminé à l'aide du bec de gaz hydrogène.

L'objection indiquée tombe devant cette explication, que j'aurais dû avoir soin de donner dès l'abord, dans le quatrième chapitre.

Quoiqu'il en soit, je ne puis que remercier M. Clausius de la bienveillance qu'il a montrée partout dans son rapport, non-seulement à l'égard de l'expérimentateur, mais à l'égard de l'interprète de l'expérience, là où il a pu le plus légitimement croire celui-ci dans l'erreur. Aussi les quelques observations, fondées à mon sens, que je viens de présenter, sont-elles bien plutôt une critique que je fais moi-même des défectuosités de mon travail premier qu'une réponse à la critique du savant rapporteur. A plus forte raison en dirai-je autant de l'ensemble d'observations et de réflexions que je vais présenter maintenant. Lorsqu'en discutant ma manière de calculer l'équivalent mécanique de la chaleur relatif à la détente de la vapeur, M. Clausius déclare formellement erronée ma méthode, il part d'une théorie particulière, qui gagne tous les jours plus de partisans dans la science, et dont il est l'un des promoteurs les

plus éminents, comme analyste et comme critique. Dans la discussion suivante, qui touche à la partie la plus sévère et aussi la plus élevée du rapport, c'est donc à toute une doctrine que j'ai à répondre, et non pas simplement à l'un de ses plus habiles défenseurs.

Pour déterminer la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur relatif au travail que produit l'expansion de la vapeur d'eau, j'ai estimé d'une part ce travail, et d'autre part la quantité de chaleur qui disparaît pendant le passage de l'eau, à l'état gazeux, à travers le cylindre de la machine à vapeur; puis j'ai divisé la première de ces quantités par la seconde.

Admettre que le quotient ainsi obtenu représente réellement la valeur de l'équivalent mécanique, c'est supposer implicitement qu'il n'y a eu aucune disparition de calorique antérieure *à l'expansion de la vapeur*, et que cette expansion est la seule cause du déchet de calorique que l'on trouve, en comparant ce qu'il a fallu dépenser pour évaporer l'eau à ce que l'on retrouve dans l'eau de condensation. C'est admettre implicitement, par suite, que la force motrice obtenue à l'aide d'une machine à vapeur sans détente, n'occasionne aucune déchet de calorique.

La théorie moderne veut qu'il ne puisse jamais se produire de travail mécanique, sans qu'il ne *disparaisse* une quantité équivalente de calorique.

La théorie de Carnot, au contraire, veut qu'il ne disparaisse jamais de chaleur, et que la force motrice, dans les machines à feu, ne soit due qu'à une *dispersion* du calorique.

La méthode de calcul appliquée, comme il est dit ci-dessus, se place en quelque sorte entre ces deux théories et les suppose *partiellement* vraies toutes deux.

Une telle supposition est-elle acceptable, ou bien est-ce la théorie moderne qui a radicalement raison? Quelle que puisse être la réponse, ce n'est en tous cas que dans les faits, dans l'expérience que nous sommes en droit de la chercher. Et quelle que puisse être la

réponse, quelque bizarre ou répugnante qu'elle puisse sembler à nos théories, nous devrons l'accepter si les faits sont bien observés.

Les faits que je vais citer ou rappeler ici peuvent se diviser en deux classes : ils sont directs ou indirects, c'est-à-dire qu'ils portent immédiatement sur la question, ou ne la touchent que médiatement, et à l'aide de certains raisonnements qui dépendent de nos idées sur les phénomènes et non des phénomènes eux-mêmes.

Chose très-remarquable à signaler de suite, ce sont certains faits indirects seuls qui justifient la théorie moderne ; mais il faut le dire, ils la justifient d'une manière tellement frappante que ce n'est qu'à l'aide de paradoxes qu'il semble possible de soutenir une opinion contraire aux déductions de cette théorie. Je commence par citer et par bien faire ressortir cet ordre de faits.

Deux circonstances remarquables, relatives à la production et à l'expansion de la vapeur sont connues aujourd'hui.

1° Pour produire la vapeur saturée, il faut dépenser d'autant plus de calorique que la pression est plus forte : la dépense de calorique par kil. de vapeur s'exprime très-approximativement par la formule empirique :

$$606,5 + 0,305\ t = Q$$

où t représente la température au point de saturation.

C'est ce qu'ont mis hors de doute les expériences si précises de M. Regnault.

Il semble donc à première vue que si l'on a de la vapeur à 5$^{at.}$ par exemple qu'on laisse se détendre jusqu'à 1$^{at.}$, cette vapeur possédera non seulement la température de 100° qui répond à cette pression, mais de plus les 0,305 (153 — 100) : 0,4805 degrés qu'on a dépensés en sus pour la produire (0,4805 étant la capacité du gaz aqueux). Il n'en est pourtant pas du tout ainsi.

2° Et la vapeur qui se détend, non seulement ne garde pas une

température supérieure à celle qui, à chaque instant, répond à la pression de la vapeur saturée, mais se condense partiellement (¹).

Il est de plus facile de prouver, du moins autant qu'un raisonnement *à priori* peut prouver quelque chose, lorsqu'il s'agit de l'état constitutif des corps, il est facile de prouver, dis-je, que cette condensation commence dès la première augmentation de volume, si petite qu'elle soit. Supposons, en effet, que pour un accroissement infiniment petit de volume la température devienne supérieure d'un infiniment petit à celle qui répond au point de saturation, ou qu'elle reste seulement égale à ce qui est nécessaire à l'existence gazeuse de l'eau, il n'y aura aucune raison imaginable pour que l'accroissement suivant, infiniment petit aussi, produise l'effet inverse. Si donc la vapeur saturée qui se détend sans addition de calorique ne se *troublait* pas par un accroissement de volume si petit qu'il soit, le phénomène ne saurait se manifester ensuite, quelque grand que soit cet accroissement.

(¹) L'appareil très-simple, à l'aide duquel on peut constater facilement ce phénomène singulier qui accompagne l'expansion du gaz aqueux, consiste en un tuyau de cuivre droit, de deux mètres de longueur et de 0,15 de diamètre, fermé à ses extrémités par des disques plats percés à leur centre d'une ouverture de 0m.,02 sur lesquelles se trouvent solidement mastiquées des plaques de verre épais et bien transparent. Ce tuyau, d'une part, est mis en rapport avec une chaudière à vapeur; et d'autre part, porte un tube d'échappement muni d'un gros robinet. Pour faire l'expérience, on pointe cette espèce de tuyau de lunette vers un lieu très-éclairé; on introduit de la vapeur à haute pression, en ayant soin d'ouvrir légèrement le robinet d'échappement pour laisser évacuer l'air et l'eau de condensation. Dans cet état de choses, en se plaçant à l'une des lucarnes du tuyau, on voit parfaitement, à travers la vapeur limpide, les objets externes vers lesquels est pointé l'instrument; si on ferme le robinet d'admission de vapeur et qu'on ouvre brusquement et complètement le robinet de décharge, de manière à ce que la pression de la vapeur tombe instantanément de 5at. (par exemple) à la pression externe, l'intérieur du tuyau devient tout d'un coup *opaque* et la plaque de verre où l'on tient l'œil *semble noire*. Au bout de quelques secondes, le gaz redevient translucide : la chaleur du métal (à 153° pour 5at.) révapore l'eau qui s'était précipitée sous forme de brouillard épais.

(Voyez, pour plus de détails, le Bulletin 133 de la Société Industrielle de Mulhouse, p. 129 à 139.)

Que semble-t-il découler de ces deux faits essentiels par rapport aux fonctions du calorique dans une machine à vapeur sans détente?

Écoutons d'abord la théorie moderne. Le calorique, dit-elle, est un mouvement particulier de la matière pondérable ; lorsqu'à l'aide de la chaleur et d'un agent intermédiaire quelconque, nous produisons du mouvement dans les corps, ce ne peut être qu'aux dépens d'une partie équivalente du mouvement qui, pour nous, simule les phénomènes du calorique. Lorsqu'à l'aide de la vapeur, nous créons de la force motrice, ce ne peut être qu'à l'aide d'une portion du *mouvement calorique* qu'il a fallu dépenser pour évaporer l'eau, et que nous avons cru latent. Et ce qui prouve qu'il en est réellement ainsi, c'est que, pour produire de la vapeur à $1^{at.}$, par exemple, il nous faut $0,305 \cdot 100° = 30^{cal.},5$ de plus que pour la produire à $0^{at.},00605$ et que cependant cette vapeur à $1^{at.}$ ne peut se détendre, ne peut nous produire la plus petite quantité de force en sus, sans se réduire partiellement en eau.

Les $30^{cal.},5$ y disparaissent donc de fait au moment même de sa formation et en produisant le mouvement externe que nous recueillons dans une machine à piston, par exemple. Et si nous condensons cette vapeur dans des conditions telles qu'il n'y ait plus ni production, ni dépense de force, nous devrons trouver dans l'eau de condensation un déficit de 30,5 par kil. de vapeur. Or, la machine à vapeur réalise en effet ces conditions. Quand le piston a été poussé en avant et nous a donné une certaine force motrice, la vapeur qui avait produit cette action se trouve mise en rapport avec un récipient où la pression est moindre que dans le cylindre et où elle se précipite, par conséquent, de manière à ce que l'équilibre se rétablisse. Pendant cet acte, il ne se produit ou ne se dépense nul travail externe.

A l'hypothèse près qu'elle pose sur la nature du calorique, la théorie moderne semble confirmée forcément par le simple raisonnement. Puisque la vapeur saturée ne peut se détendre d'une pression à une autre sans se condenser en partie, il semble évident, en toute hypothèse, que le calorique qu'il a fallu en sus pour la produire à la pression initiale, y a disparu de fait. Et si nous met-

tons en communication deux récipients dont l'un contient une portion déterminée de vapeur comprimée, et l'autre de la vapeur à une moindre pression et à une moindre température tenue constante, nous ne voyons aucune raison pour qu'il y ait un accroissement ou un déficit dans le calorique actuellement disponible; nous ne pouvons trouver dans l'eau de condensation que le calorique que représentait la vapeur au moment de la condensation, et non celui qui y manquait déjà.

Voici donc un fait indirect qui semble prouver positivement que la force motrice que nous donne une machine à vapeur sans détente coûte du calorique, comme celle que donne une machine à détente. Il condamne formellement la méthode de calcul que j'ai employée pour trouver la valeur de l'équivalent mécanique; et nous verrons qu'on ne peut éviter cette condamnation qu'en admettant l'intervention d'un phénomène en apparence paradoxal.

Mais poursuivons d'abord l'étude des faits indirects. Nous allons en rencontrer deux qui déjà ne sont plus d'accord avec le précédent, du moins quant aux déductions qui en découlent.

A l'aide d'applications numériques, dégageons la discussion de son caractère abstrait.

Un kil. d'eau coûte $30^{cal.},5$ de plus pour être évaporé sous une pression de $0^{m.},76$ (et à 100° par suite) que pour l'être à $0^{m.},0046$ (et à 0°). Cette vapeur à $1^{at.}$ ne peut se détendre le moins du monde sans se *troubler;* donc les $30^{cal.},5$ qu'on a dépensées de plus y font déficit. Ceci semble évident en toute hypothèse. Mais si c'est le travail exécuté de fait par la production de la vapeur à $1^{at.}$, que coûte ce calorique, la valeur de l'équivalent mécanique doit ici nous être donnée exactement sans aucune expérience sur la machine à vapeur.

Un kil. d'eau, en effet, donne $1^{m.c.},698$ de vapeur à 100° et à $0^{m.},76$ elle soulèverait donc à $1^{m.},698$ un piston d'un mètre carré chargé d'un poids de $0,76 . 13595^{k.} = 10333$. Comme nous sommes partis de 0°, nous devons condenser à 0°; la résistance de la vapeur à la descente du piston sera donc de $0^{m.},0046 . 13595^{k.}$ et nous ob-

tiendrons en définitive $(10333^{k.} - 62^{k.},5)\ 1^{m.},696 = 17418^{k.m.}$ de travail. En divisant ce nombre par $30^{cal.},5$, on a $571^{k.m.}$ qui doit être la véritable valeur de l'équivalent. Ce chiffre diffère tellement de la plus forte valeur trouvée dans les expériences sur le frottement, qu'on pourrait déjà douter de la constance de l'équivalent en général. Ne nous arrêtons pas cependant à cette première discordance : nous allons en trouver une beaucoup plus importante.

Pour évaporer $1^{k.}$ d'eau à la pression de $5^{at.}$ ou $5.0^{m},76$, il faut dépenser $16^{cal.},165$ de plus que pour l'évaporer à $0^{m},76$. Cette vapeur à $5^{at.}$ aussi se trouble pour peu qu'elle se détende : donc (en apparence au moins) les $16^{cal.},165$ y font défaut. Au lieu de prendre pour la valeur de l'équivalent le nombre ci-dessus ($571^{k.m.}$), n'acceptons comme vrai que le chiffre $432^{k.m.}$ trouvé par l'expérience, dans le frottement de l'eau. En multipliant $432^{k.m.}$ par $16^{cal.},165$, on a $6983^{k.m.}$: c'est évidemment le travail que la vapeur à $5^{at.}$ doit nous fournir de plus que la vapeur à $1^{at.}$, lorsque nous évaporons $1^{k.}$ en partant de 0°, et que nous revenons à 0°. Mais la vapeur à $1^{at.}$ nous donne $17418^{k.m.}$ de travail : donc celle à $5^{at.}$ doit nous donner $24401^{k.}$

Pour faire équilibre à la pression de cette vapeur, un piston d'un mètre carré devrait être chargé de $5.\ 0^{m},76.\ 13596^{k.}$ ou $51665^{k.}$; après la condensation, il redescendrait avec une contrepression de $62^{k.},5$: il travaillerait donc sous une charge de $51665^{k.} - 62^{k.},5 = 51602^{k.},5$. A quelle hauteur devrait-il s'élever, pour produire nos $24401^{k.}$? évidemment à

$$\frac{24401}{51602,5} = 0^{m.},47286.$$

Un litre d'eau doit donc donner $472^{lit.},86$ de vapeur à $5^{at.}$. Pour arriver à ce nombre, nous sommes partis de trois données expérimentales, à l'abri de toute objection :

1° Le volume 1698 donné depuis longtemps par Gay-Lussac pour la vapeur à $1^{at.}$; 2° l'excès de calorique dépensé pour la vapeur à $5^{at.}$ par rapport à la vapeur à $1^{at.}$, et calculé à l'aide de la formule de M. Regnault :

$(606,5 + 0,305\,t) - (606,5 + 0,305\,t)$;

3° une des valeurs numériques les plus généralement acceptées aujourd'hui pour l'équivalent mécanique.

Si le volume 472$^{lit.}$,86 calculé ainsi ne coïncide pas avec celui que donne l'expérience directe, nous serons en droit d'en conclure que le point de départ du calcul est faux, et que les 16$^{cal.}$,169 que nous dépensons de plus pour la vapeur à 5$^{at.}$ ne sont point en entier converties en travail externe.

Jusqu'ici les traités de physique ne donnent, pour les volumes occupés par la vapeur à diverses pressions, que des nombres calculés à l'aide d'une formule qui repose sur ces deux hypothèses : 1° la vapeur, portée à une température suffisante et tenue constante, se laisse comprimer selon la loi de Mariotte ; 2° à égalité de pression, elle se dilate selon la loi de Gay-Lussac (1 + at.), lorsqu'on l'échauffe au-dessus de sa température de saturation. En admettant même que ces deux hypothèses soient l'expression réelle des faits (ce qui n'est pas le cas, comme on le sait aujourd'hui), il reste encore évident qu'elles ne pouvaient légitimement être appliquées *à priori* à ce qui se passe pendant la formation même de la vapeur. La formule

$$V = 1696\,\frac{0,76}{P}\cdot\frac{1 + at}{1 + 100a}.$$

suppose implicitement que la vapeur saturée à la pression P peut s'abaisser sans condensation au-dessous de la température t du point de saturation ; ce qui est impossible. Les nombres calculés à l'aide de cette formule ne peuvent avoir qu'une valeur de convention et demandent à être vérifiés directement. Cette lacune de la physique expérimentale sera sans doute comblée très-prochainement (si elle ne l'est déjà) par les recherches si précises de M. Regnault. Cependant, comme à ma connaissance rien n'a encore été publié sur ce sujet, j'ai cru devoir déterminer moi-même un ou deux nombres, afin de les comparer à ceux des tables. Dans la note A, qui se trouve à la fin de ce chapitre, j'ai décrit très en détail le procédé qui m'a servi à ce genre de recherches : je pense qu'on peut en regarder les résultats au moins comme très-approximatifs.

Je suis arrivé pour la vapeur saturée à $5^{at.}$ à deux volumes sensiblement différents selon le mode d'expérimentation : l'un est 325 et répond à une expérience faite directement sur de la vapeur saturée ; l'autre est 353, et répond à une expérience faite sur de la vapeur *surchauffée* à 157° et ramenée par un calcul de correction à 153°. J'ai décrit assez exactement ma méthode d'observation pour que les physiciens puissent juger par eux-mêmes quel est le nombre qui mérite le plus de confiance. Quoi qu'il en soit, en ne prenant pour vrai que le second, qui évidemment ne peut pécher en moins, on voit : 1° que le volume de la vapeur à $5^{at.}$ ne s'éloigne pas notablement de celui que donnent les tables (388) ; 2° qu'il s'éloigne énormément de celui que nous avons calculé par le procédé indiqué plus haut. Or c'est ce dernier point surtout qu'il importait d'éclaircir par la voie expérimentale.

La vapeur à $5^{at.}$ n'occupant au maximum que 353 fois le volume de l'eau, $1^{k.}$ d'eau d'abord à 0°, converti en vapeur à $5^{at.}$ que l'on condense ensuite à 0°, ne peut donner que $0,353.51598^{kil.} = 18214^{k.m.}$ de travail mécanique ; autrement dit $755^{k.m.}$ de plus que la vapeur à $1^{at.}$ et non $432.16,165 = 6983^{k.m.}$ comme il en devrait être si les $16^{cal.},163$ qu'il faut de plus pour produire la vapeur à $5^{at.}$ au lieu de $1^{at.}$, étaient converties en travail.

Les deux faits indirects qui viennent d'être cités ne nous apprennent rien à la vérité sur le rapport existant dans une machine à vapeur sans détente entre la quantité de calorique envoyée par la chaudière, et celle qu'on trouve dans l'eau du condenseur. Mais ils sont en désaccord formel avec les résultats numériques auxquels conduit la théorie mécanique de la chaleur. Ils nous montrent qu'il n'existe pas de rapport défini entre le calorique qui semble disparaître pendant la production de la vapeur, et la force motrice que crée cette production. Mais ils ne nous apprennent pas du tout si le calorique qui semble avoir ainsi disparu se retrouve dans l'eau de condensation, ou non. Ce désaccord toutefois a une signification très-importante ; il nous montre que nous sommes fort loin encore de pouvoir poser et trancher les faits *a priori*, au nom d'une hypothèse particulière ; il nous montre que l'expérimentateur doit beaucoup plus se préoccuper de ce qu'il peut y avoir de général et de

juste dans les données subsidiaires d'une théorie, que des conséquences immédiates de l'hypothèse d'où elle part. La théorie mécanique de la chaleur est *condamnée* à dire que dans une machine à vapeur sans détente, le travail n'est produit qu'aux dépens d'une certaine quantité proportionnelle de calorique : mais indépendamment de toute hypothèse, le raisonnement général nous a conduits à la même affirmation. C'est donc là ce qui doit attirer notre attention, comme expérimentateurs; c'est là ce que nous devons chercher à bien analyser, afin de voir jusqu'où s'étend cette concordance d'une théorie particulière et du raisonnement.

La condensation de la vapeur peut s'opérer de six manières distinctes qu'il est essentiel de bien préciser.

1° La vapeur produite sous une pression parfaitement constante passe au fur et à mesure, sans changement de pression, dans un vase tenu à une température constante et inférieure à la sienne, où elle se condense sous la pression initiale.

2° Elle est produite sous une pression constante et se précipite au fur et à mesure dans un vase tenu à une température inférieure, où elle se condense par suite à une pression inférieure.

3° La vapeur, une fois produite, est séparée de l'eau, mise en contact avec un corps froid, et passe ainsi peu à peu de sa température et de sa pression initiales, à une température et à une pression inférieures.

4° Cette vapeur, séparée de l'eau, est mise en rapport avec un récipient vide tenu à une température inférieure; elle s'y précipite sous une pression décroissante et s'y condense sous une pression constante.

5° La vapeur, séparée de l'eau, se trouve dans un récipient dont le volume s'accroît d'une quantité déterminée; puis elle est mise en contact avec un corps froid.

6° Ou bien, elle est mise en communication avec un récipient vide tenu à une température inférieure, où elle se précipite jusqu'à ce qu'il y ait égalité de pression entre les deux vases, et où elle se condense sous une pression constante.

Le premier mode de condensation a été réalisé dans les belles expériences de M. Regnault sur le calorique latent de la vapeur. Le troisième mode se réalisait dans les machines primitives où l'on injectait de l'eau froide dans le cylindre même après chaque course du piston. Les quatrième et sixième modes s'appliquent dans les machines actuelles, sans détente ou avec détente, qu'elles soient d'ailleurs munies ou non d'un condenseur : car une pompe où la vapeur s'échappe à l'air libre est en réalité une machine qui condense à 100° et à 1$^{at.}$ de pression.

Au point de vue de la théorie mécanique de la chaleur, ces six modes sont identiques deux à deux et se réduisent par suite à trois, lorsqu'on met en rapport la quantité de calorique nécessaire pour évaporer l'eau et celle qu'on retrouve après la condensation et le rétablissement de la température initiale. Dans le premier et le second cas, il doit y avoir égalité entre ces deux quantités de calorique; dans le troisième et le quatrième cas, il doit y avoir un déchet de calorique proportionnel au travail mécanique que représente le produit de la pression de la vapeur par le volume engendré; dans le cinquième et le sixième cas enfin, le déchet doit être proportionnel au travail total engendré par la production même de la vapeur et sa détente. Jusqu'à quel point se vérifient ces affirmations de la théorie? C'est ce que je vais essayer de chercher maintenant.

Le premier mode de condensation a été appliqué rigoureusement par M. Regnault. L'égalité entre les quantités de calorique dépensées et recueillies a été mise hors de doute par lui.

Le sixième mode se trouve appliqué dans toutes nos machines à vapeur à détente. Il est hors de doute aujourd'hui que la vapeur subit ainsi un déchet de calorique; mais il s'agit de savoir à quelle période du travail se rapporte le déchet.

A ma connaissance, aucune expérience directe n'a été faite avec le troisième mode. Mais ici le raisonnement, dégagé de toute hypothèse, et appuyé sur deux faits indirects, nous permet de répondre tout aussi positivement que ne pourrait le faire l'expérience ellemême. Pour produire un kilo de vapeur à 100° et à 1$^{at.}$, il faut

dépenser 30cal·,5 de plus que pour l'évaporer à 0°, et cependant cette vapeur à 1at· se trouble, se condense partiellement, pour peu qu'on en diminue la pression (sans addition ni soustraction de calorique) : donc elle ne représente plus assez de calorique pour rester saturée à une pression, moindre d'un infiniment petit seulement. Or, que se passe-t-il si nous mettons la vapeur contenue dans un vase inextensible, en contact avec un corps froid ? Une partie se condense évidemment par soustraction de calorique : dès-lors la pression baisse dans le récipient, et une autre partie de vapeur se condense par le fait seul de cette chute de pression. Comme à chaque instant la vapeur restant ne renferme que juste ce qu'il lui faut de calorique pour exister à l'état gazeux, il est bien clair qu'à chaque instant aussi, il s'y opère une condensation accessoire à celle que détermine la soustraction directe du calorique : il est bien clair que pour la ramener à la température et à la pression initiales, il faut lui soustraire moins de calorique qu'il n'a fallu en dépenser pour la produire. Il est de plus facile de voir que si nous comprimons à 0° de la vapeur à 100°, par exemple, la différence en moins sera précisément égale à nos 30cal·,5 qu'il faut de plus pour produire 1k de vapeur à 1at· et à 100° que pour la produire à 0°.

Donc, dans les machines à vapeur primitives sans détente, où la condensation s'opérait par injection d'eau dans le cylindre, il y avait un déchet de calorique dépendant directement du rapport des deux pressions, initiale et finale, de la vapeur à son entrée et à sa sortie.

Un même raisonnement nous permet de décider à l'égard du 5e mode. Dans une machine à vapeur à détente où l'on condenserait dans le cylindre même, il est certain que nous trouverions un déchet de calorique formé de celui qui vient d'être évalué numériquement et de celui qu'occasionnent en outre *l'extension du récipient de la vapeur* et la chute de pression qui y répond. Il ne nous reste donc à nous arrêter que sur le 2e, le 4e et le 6e mode de condensation.

J'ai dit (page 145) que le raisonnement *semble* d'accord avec la théorie, quant au 4e mode, et nous pourrions ajouter, quant au 2e et au 6e ; je crois avoir assez bien fait ressortir cet accord pour n'avoir pas à y revenir. Peut-on cependant, *à priori*, assimiler les

résultats finaux de phénomènes qui s'opèrent dans des conditions aussi différentes?

Dans le 1er, le 3e et le 5e cas, la vapeur se condense sans sortir notablement de l'état de repos; dans le 2e, le 4e et le 6e cas, elle entre violemment en mouvement et revient tout aussi brusquement au repos, dans le récipient où elle se jette. N'est-ce point aller trop loin que de décider à l'avance l'identité finale des résultats, au point de vue de la mesure calorimétrique? J'ai pensé que sans se montrer par trop sceptique à l'égard des théories, il était pourtant permis ici de douter. Et l'expérience va bientôt nous montrer que ce doute était très-légitime. Mais avant de citer les faits, je vais donner encore plus de force aux assertions de la théorie mécanique en montrant à quel paradoxe (au moins apparent) nous condamne ici le moindre doute. Occupons-nous du quatrième cas, et pour fixer les idées, prenons de suite un exemple numérique.

Supposons un kilog. de vapeur saturée à 100° renfermé dans un vase inextensible, et imperméable au calorique; mettons ce récipient en communication avec un autre, vide, perméable au calorique, et tenu à 0° (par un courant d'eau, par exemple). La vapeur va se précipiter sous une pression décroissante du premier vase dans le second, et s'y condensera sous la pression 0m,0046 (en hauteur de mercure) : à mesure qu'elle se détend dans le premier vase, elle se refroidit, se trouble, se condense partiellement; de l'eau est lancée avec la vapeur dans le condenseur, et de plus la vapeur et l'eau, poussées par une pression toujours moindre, arrivent évidemment dans ce condenseur avec une vitesse de plus en plus faible. Pour produire notre kilog. de vapeur, il a fallu dépenser 653 cal.,153 : combien de calories devrons-nous soustraire au condenseur pour le tenir à 0°? La théorie mécanique nous répond que nous aurons à soustraire ce même nombre diminué du quotient obtenu, en divisant par l'équivalent mécanique de la chaleur le travail produit par la vaporisation de notre kilog. d'eau. Hasardons-nous un doute? Allons-nous jusqu'à dire que peut-être il faudrait enlever au condenseur notre nombre primitif 653 cal.,153? La théorie nous demande alors avec raison ce qui adviendrait si, au lieu de permettre à la vapeur de se détendre, de se refroidir, de se condenser par-

tiellement dans le premier vase, nous l'y tenions à la même pression en y en envoyant sans cesse de nouvelle, et si nous la forcions de la sorte à se jeter avec une vitesse *maxima* et *constante* dans le condenseur. Et à cette question pressante nous sommes obligés de répondre qu'alors nous devons trouver dans l'eau du condenseur plus de calorique que nous n'en avions dépensé pour produire la vapeur!

Mais le 4e mode de condensation que nous discutons se trouve, comme nous l'avons dit, réalisé dans une machine à condensation sans détente. Donc, si le travail mécanique donné par une telle machine n'occasionne pas une annihilation de calorique; si dans l'eau de condensation nous retrouvons toute la chaleur fournie à la chaudière, nous sommes forcés de dire que nous devrons trouver dans cette eau *plus que* cette chaleur, lorsqu'au lieu de faire passer la vapeur par le cylindre, nous la lancerons directement dans le condenseur! Et réciproquement, si le deuxième mode de condensation ne nous donne pas plus de calorique que le premier, que celui qu'a employé M. Regnault, nous sommes forcés de dire que dans une machine à vapeur quelconque, avec ou sans détente, la force produite occasionne un déchet de calorique.

La méthode de calcul que j'ai employée pour déterminer l'équivalent mécanique relatif à la vapeur d'eau, la méthode critiquée (p. 132) se trouve, comme on voit, soumise à une redoutable épreuve. Elle se trouve en face d'un paradoxe expérimental apparent, et si ce paradoxe ne se réalise pas, elle est positivement erronée. Mais aussi, si ce paradoxe se réalise, elle est mise hors des atteintes de toute critique.

Eh bien! ce paradoxe apparent n'est autre chose que l'expression des faits. Lorsque de la vapeur à $5^{at.}$ surchauffée à 180°, par exemple, se précipite dans un espace où elle n'est plus soumise qu'à $1^{at.}$, et où elle se condense sous cette pression constante, la théorie mécanique nous dit que nous devrions retrouver dans le calorimètre condenseur les

$$(606,5+0,305.153^{\circ}+(180^{\circ}-153^{\circ}).0,4805)$$

calories, ni plus ni moins, que nous avons dépensées pour la pro-

duire. Il n'en est pas du tout ainsi pourtant ; et des mesures calorimétriques, faites avec les soins les plus minutieux, m'ont donné *au moins* 25$^{cal.}$ de plus pour le nombre retrouvé (Note B).

Ce résultat si singulier est confirmé *partiellement* par un phénomène d'un autre genre, qui n'exige point de mesures calorimétriques, pour être évalué numériquement, et qui est aussi en somme plus facile à vérifier. La vapeur saturée à une température t nous coûte $(606{,}5+0{,}305\,t)^{cal.}$ par kil. ; un kil. de vapeur saturée à une autre température t' nous coûte donc

$$(606{,}5+0{,}305t')-(606{,}5+0{,}305t)=0{,}305\,(t'-t)^{cal.}$$

de plus. D'après la théorie, notre vapeur à t', lancée sous forme de jet dans une enceinte où la pression n'est plus que celle qui répondrait à t, doit reproduire à la condensation tout le calorique qu'elle a coûté ; or ceci ne peut, *à ce qu'il semble du moins*, avoir lieu qu'en vertu d'une élévation de température de la vapeur détendue, et il est clair qu'en multipliant cette température par la capacité calorifique, le produit doit représenter exactement l'excès $0{,}305\,(t'-t)$.

On a donc

$$0305\,(t'-t)=(T-t)\,C,$$

C étant la capacité du gaz aqueux, et T sa température après la détente.

En opérant sur de la vapeur à 5^{at} et à 153° qui se détend sous forme de jet à la pression 0^{m},74 et en mettant à la place de C sa valeur 0,4805 donnée par M. Regnault, on a :

$$0{,}305\,(153-99)=0{,}4805\,(T-99)$$

d'où T=134°,27 pour la température que doit avoir la vapeur après la détente brusque, *s'il ne se produit point d'excès de chaleur*.

L'expérience directe nous donne $T=t=155°$ (notre C) et par conséquent

$$(153 - 99)\ 0,4805 = 9^{cal},782$$

en excès. Cet excès est assez notable pour mettre en principe et d'avance à l'abri d'une critique radicale les expériences calorimétriques que j'ai citées plus haut : il ne l'est pas assez pourtant pour les confirmer complètement, comme évaluations numériques. En effet, l'excès que j'ai indiqué s'élève à 25^{cal} au moins ; il correspond, il est vrai, à de la vapeur surchauffée à 180° ; mais cette circonstance ne suffit aucunement pour expliquer le désaccord, si nous voulons nous tenir dans nos idées actuelles sur la permanence de l'état constitutif des gaz. D'après ces idées, un kilog. de la vapeur d'eau, condensé à 0° sous une pression constante à laquelle répond la température de saturation t, doit nous donner

$$(605,5 + 0,305\,t + (T - t)\ 0,4805)^{cal}.$$

par kil., *de quelque manière qu'elle ait été portée à l'excès de température* T ; et dès lors, pour arriver à l'excès 25 que j'ai indiqué, il faudrait que la vapeur brusquement détendue, de 5^{at} à 1^{at} eût un température Θ donnée par l'équation

$$0,305\,(153 - 99) + 0,4805\,(180 - 153) + 25 = (\Theta - 99)\ 0,4805$$

$$\text{d'où } \Theta = (113^{o},3 + 99^{o}) = 212^{o},3 ;$$

il faudrait, en un mot, que la température après l'expansion brusque, fût de 32°,3 supérieure à la température initiale 180°.

J'ai souligné la phrase : *de quelque manière qu'elle ait été portée à l'excès T*.... Il y a peu d'années (dix ou quinze à peine) que le monde scientifique eût répondu par la plus profonde incrédulité au physicien qui se serait permis de douter de la vérité de l'assertion qu'exprime cette phrase. Aujourd'hui je pense ne plus courir le même risque en disant : 1° que cette assertion pourrait fort bien n'être qu'une hypothèse ; 2° que le désaccord apparent des deux genres d'expériences citées ne prouve pas du tout que l'une ou l'autre soit fausse ; 3° qu'il n'est pas du tout impossible qu'une vapeur saturée, sans éprouver aucun changement de tem-

pérature, représente plus de calorique après avoir été violemment tirée du repos et ramenée au repos, que quand elle vient de se former. Si dans des questions où l'expérience seule a jusqu'ici le droit de décider, il pouvait être permis de partir de simples analogies, je dirais que, ce que je ne fais que hasarder ici, comme possible, quant aux gaz, est positif pour un grand nombre de liquides. Un travail expérimental que je poursuis dans ce moment, et que j'espère terminer bientôt, prouvera en effet que certains liquides, essayés dans les mêmes conditions et à l'aide du même appareil, donnent, pour un même travail dépensé, des quantités diverses de calorique selon qu'ils ont été, ou non, soumis à des mouvements violents antérieurs à l'expérience, et que ces variations, tellement grandes qu'il est impossible de les attribuer à des erreurs d'expérience, ne reposent pas sur un changement quelconque de densité, de fluidité, de composition, de capacité calorifique, mais seulement sur ce fait : *qu'ils ont été ou non tirés de leur repos antérieur.*

Quoiqu'il en soit, l'hypothèse que *je hasarde* quant aux gaz sera mise hors de doute, si, comme j'ai lieu de l'espérer, mes expériences calorimétriques sur les vapeurs se trouvent confirmées par d'autres physiciens.

Le surcroît de calorique que donne la vapeur lorsqu'elle passe sous une pression constante dans un condenseur où elle se détend brusquement, ce surcroît, dis-je, rend non-seulement probable, mais à peu près certain que dans le quatrième mode de condensation nous devrons retrouver tout le calorique dépensé d'abord à la production de la vapeur. Tout l'ensemble des faits que nous avons passés en revue nous montrent qu'on peut admettre, sans crainte de tomber dans l'absurde, que dans une machine à vapeur sans détente le travail produit n'entraîne point un déchet réel de calorique. Le dernier fait indiqué, non-seulement dégage cette assertion de son caractère apparent d'absurdité, mais la met en quelque sorte hors de doute comme vérité. Néanmoins, dans des recherches aussi délicates que celles dont il s'agit ici, dans des expériences où l'on se heurte à tout moment contre des anoma-

lies apparentes ou contre des bizarreries, une preuve directe pourra sembler nécessaire. Plus d'un lecteur même peut-être se sera déjà demandé pourquoi, dans une question de faits, je n'ai pas été droit au fait principal à mettre en lumière, et pourquoi je me suis arrêté si longtemps sur la description de phénomènes pour ainsi dire accessoires au phénomène spécial à vérifier. Les raisons de ce retard dans la démonstration vont être saisies facilement.

Mille et mille faits favorables à une théorie ne suffisent pas toujours pour en mettre hors de doute la justesse : un seul fait réellement contraire suffit pour la renverser au moins partiellement. La théorie moderne, la théorie mécanique de la chaleur, repose aujourd'hui sur un grand nombre de données expérimentales à l'abri de la critique ; elle est acceuillie avec une sorte de prédilection par les physiciens, théoriciens ou expérimentateurs, les plus éminents de notre époque ; j'ajoute que comme expression d'un principe général des lois de l'équilibre, elle est à l'abri de toute objection : il n'en est pas moins évident qu'elle sera contrainte de se modifier radicalement dans l'hypothèse première d'où elle part, *si l'expérience nous montre un seul cas où il se produise du travail sans un déchet équivalent de chaleur.* L'expérience se pose ainsi en quelque sorte comme un juge sans appel ; mais par cette raison même, on a le droit d'être beaucoup plus exigeant et plus scrupuleux dans l'examen de ses résultats.

L'étude du fait particulier si important dont il s'agit ici est entourée de difficultés toutes très-grandes, quelques-unes insurmontables ; en dépit de l'attention que j'ai mise dans mes expériences, en dépit des efforts que j'ai faits pour les rendre exactes, je ne puis pourtant en donner les résultats que comme des approximations. Il m'a donc semblé nécessaire d'indiquer d'autres phénomènes en harmonie entre eux, et liés au phénomène principal d'une manière indirecte afin de suppléer par des confirmations accessoires à ce qui peut manquer à la rigueur absolue de la vérification directe. Je puis maintenant parler de cette dernière sans m'occuper désormais de ce qu'elle peut renfermer de contradictoire avec nos idées préconçues.

Lorsque, dans les premières expériences calorimétriques que je fis sur la machine à vapeur, je trouvai un déchet de calorique considérable dans l'eau de condensation, je fus porté à croire que ce déficit devait être attribué à la totalité du travail effectif de la machine; et pour avoir la valeur de l'équivalent mécanique la chaleur, je divisai alors ce travail par le nombre de calories manquant. C'est là le sens de la lettre que j'écrivis, le 21 octobre 1854, au président de la Société Industrielle de Mulhouse, et dont je donne en note un fragment (1). La machine qui me servait dans ces essais était la pompe Woolf dont je parle (page 27). Ayant opéré un jour sur la machine à un cylindre dont le mécanisme de détente se trouvait brisé par accident, et qui travaillait par suite avec une expansion très-faible, je ne trouvai plus qu'un déchet de calorique insignifiant. Dans le premier moment le doute me saisit à l'égard de mes expériences sur la machine Woolf; je les crus fausses; je crus avoir été induit en erreur, quant au déchet de calorique, par l'imperfection de mes procédés d'expérience. Ce ne fut qu'après bien des répétitions que j'arrivai à cette conclusion : qu'au point de vue calorimétrique, la marche d'une pompe se divise en deux périodes : l'une où le piston marche en pleine pression et où la force est donnée sans déchet de calorique; l'autre, où la force est donnée par l'expansion et coûte au contraire du calorique. En raison de la dépense énorme de combustible qu'occasionne la marche sans détente d'une grande pompe; en raison des difficultés surtout que présente la direction de la machine, pendant cette marche, je n'ai pu répéter mes expériences pour le travail que je destinais au concours ouvert par la Société de physique de Berlin. J'ai eu le tort très-grave de ne pas même mentionner ces expériences, tout en présentant d'une manière tranchée les conclusions auxquelles elles m'avaient mené. M. Clausius, dans son rapport, a donc pu fort légitimement me déclarer dans l'erreur au point de vue de la théorie en parlant de ma méthode de calcul (page 132).

(1) « .... Il y a donc *disparition* et non pas simplement *dispersion* de calorique dans un moteur à vapeur. Et la force obtenue est précisément proportionnelle à la quantité qui disparaît comme chaleur pour apparaître comme travail... »

Aujourd'hui, je dirai très-franchement que je ne regrette point cette lacune de mon travail. A la lecture du rapport de M. Clausius, mon premier sentiment fut que, si les expériences dont je parle avaient pu former chez moi une conviction fondée, je n'étais pas en droit d'en attendre le même résultat chez d'autres physiciens : elles étaient relativement trop peu exactes pour cela. Chacun peut s'assurer que lorsqu'on exécute soi-même une expérience, et qu'on en suit attentivement la marche, on arrive à en saisir le fort et le faible, *à se l'assimiler*, pour ainsi dire, de telle sorte que les conclusions qu'on est en droit d'en tirer pour soi-même, ont un caractère de certitude qu'on n'est nullement en droit de faire accepter par d'autres personnes. Pour opposer un fait purement expérimental à l'argumentation si claire et si logique que M. Clausius appuie non-seulement sur une théorie particulière, mais sur les notions générales de l'équilibre, il fallait que ce fait fût prouvé par une méthode en quelque sorte à la hauteur de l'argumentation même. C'est là le but que je me suis efforcé d'atteindre dans la suite d'expériences que j'ai exécutées tout récemment, et qui se trouvent décrites avec détail dans la note D. Le résultat principal de ces nouvelles recherches est :

1° Que dans une machine marchant avec vapeur surchauffée et avec aussi peu de détente que possible, on retrouve dans l'eau de condensation tout le calorique dépensé à vaporiser l'eau ;

2° Que, dans une machine marchant avec très-peu de détente et avec vapeur surchauffée, l'eau de condensation représente plus que le calorique dépensé, lorsqu'il existe une très-forte différence entre la pression dans la chaudière et la pleine pression dans le cylindre ;

3° Qu'il n'y a de déchet de calorique que quand la machine marche avec détente.

Au point de vue tout expérimental, je n'ai par conséquent point commis d'erreur dans la détermination de l'équivalent mécanique, en divisant en deux périodes l'action de la vapeur dans une pompe, et en ne divisant par le nombre de calories disparues que la somme

de travail donnée par la détente. Cette assertion me semble d'ailleurs justifiée par une considération indirecte très-importante.

Pour me conformer au vœu émis par la commission de la Société de physique de Berlin, j'ai ajouté au tableau D quelques éléments qui y manquaient ; j'ai fait les corrections qui m'ont été possibles, et j'ai placé à côté de la colonne de l'équivalent, calculé par ma méthode, une autre colonne où j'ai introduit l'équivalent calculé, en divisant par le déchet de calorique la somme totale du travail produit. On voit que les valeurs de l'équivalent ainsi calculées varient énormément, ce qui ne devrait pas avoir lieu si le déchet de calorique se rapportait effectivement à l'ensemble du travail de la machine. Et l'on me permettra sans doute de dire que de tels écarts ne peuvent plus être attribués légitimement aux erreurs expérimentales seules. Des erreurs même très-considérables sont inévitables dans de telles recherches ; je me suis heurté contre trop de difficultés insurmontables pour n'être pas le dernier à me faire illusion à cet égard. Si l'on fait cependant attention que les chiffres que m'a donnés la nouvelle série d'expériences dont je parle, ne diffèrent pas d'une manière très-notable des premières, bien que l'emploi d'une méthode tout-à-fait différente ait soumis mes anciennes expériences à une épreuve critique et contradictoire, on reconnaîtra certainement que des variations du simple au double ne peuvent plus être attribuées à des fautes, et portent au contraire sur la nature des phénomènes.

NOTE A.

VOLUMES ET DENSITÉS DE LA VAPEUR D'EAU A DES PRESSIONS SUPÉRIEURES A UNE ATMOSPHÈRE.

Ainsi que je le dis dans le texte, mon but dans ces recherches a été de comparer deux ou trois des volumes que donnent les tables ordinaires des ouvrages de physique avec les volumes correspondants, déterminés expérimentalement. Je me suis servi de deux appareils distincts que je crois devoir indiquer, bien que l'un d'eux ait donné des résultats probablement inexacts.

1° Le premier consistait (fig. 1, Pl. VI.) en une chaudière cylindrique *aaa'a'* en cuivre épais, renfermée dans une autre *bbbb* de même forme, mais assez grande pour qu'il y eût partout $0^m,04$ d'intervalle entre elles. La chaudière interne, ou *jaugeur*, avait $16^{lit.},9$ de capacité et ne communiquait avec la chaudière externe qu'à l'aide du tube *ccc* muni d'un robinet en *r*; son autre extrémité *a'a'* pouvait être mise en rapport avec l'air extérieur à l'aide du tube en T, *ddd*, muni en *s* et *s'* de robinets; le robinet *s'* portait un tube de verre *vv* qui allait plonger au fond d'un vase B plein d'eau froide. Le gros tuyau vertical NN amenait à l'appareil la vapeur d'un générateur voisin; une petite ouverture de $0^m,001$ à peine, pratiquée au bas de la chaudière *bbbb*, laissait échapper constamment un filet de vapeur et l'eau de condensation.

Pour faire une expérience, on laissait arriver la vapeur à la pression voulue dans l'espace libre compris entre les deux chaudières concentriques; on ouvrait les robinets *r* et *s* de manière à expulser l'air de la chaudière interne; on fermait *r* pendant quelques instants de manière à faire évaporer l'eau qui pouvait avoir été entraînée en *aaa'a'*; on fermait *s*, et après avoir chauffé le tuyau *ccc* avec une lampe à esprit de vin, de telle sorte qu'il ne pût pas passer d'eau par ce tube, lorsqu'on ouvrait ensuite un peu le robinet *r*,

et lorsqu'ainsi on introduisait la vapeur dans l'intérieur jusqu'à ce qu'elle y eût atteint la pression et la température de la vapeur saturée de l'enveloppe; on refermait alors *r* et l'on ouvrait *s'*; la vapeur se précipitait et se condensait dans l'eau froide du vase B; on attendait que la détente et la condensation fussent assez complètes pour que l'eau, *remontant dans le tube de verre*, fût arrivée à la hauteur du niveau externe.

On répétait ces alternatives de charges et de décharges de vapeur autant de fois qu'il était nécessaire pour obtenir un accroissement convenable de poids du vase B, pesé avec soin avant et après l'expérience.

Il est clair que par ce procédé on arrivait aisément à déterminer le poids de la vapeur renfermée dans la chaudière *a a' a' a'*. En effet, lorsque cette chaudière était pleine de vapeur saturée, à une pression connue, on ouvrait le robinet *s'*, le gaz aqueux s'échappait jusqu'à ce que la pression fût devenue égale à celle qu'indiquait le baromètre au moment de l'expérience. La portion condensée dans le vase B était pesée directement; celle qui restait en *a a' a' a'* se calculait très-approximativement. En effet, à la température de 100° et à une atmosphère, la vapeur occupe 1698 fois le volume de l'eau; mais dans notre chaudière elle avait, après la détente, la pression B de l'air externe et la température de la vapeur saturée de l'enveloppe. On a donc

$$\Pi = \frac{161^{\text{lit.}},987(1+bt)}{1698} \cdot \frac{B}{0.76} \cdot \frac{1+a100}{1+at},$$

b désignant la dilatation cubique du cuivre et *a* celle de la vapeur.

Or on a $b = 0,000017$ et l'on peut écrire, sans risque de commettre une grande erreur, puisqu'il ne s'agit ici que d'une correction, $a = 0,00366$. On verra bientôt d'ailleurs que cette correction est probablement exacte.

2° Le second appareil consistait en une seule chaudière en cuivre de $27^{\text{lit.}}$ 85 de capacité, munie comme l'indique la figure 2 (planche VI.) de deux robinets, l'un *r* servant à amener la vapeur d'un géné-

sateur, l'autre r', permettant de la laisser s'échapper par le tube soudé $a a' a''$ en verre à partir de a' en a''. La chaudière était plongée dans un bain d'huile, y compris le tube vertical b; ce bain était tenu très-exactement à une température voulue, et constamment agité, afin que sa température ne variât pas d'un point à un autre.

L'expérience était conduite comme avec l'appareil précédent. Lorsqu'on avait expulsé l'air en ouvrant et fermant alternativement les robinets r et r', on fermait r'; on ouvrait r; on attendait quelques instants, pour que la vapeur pût prendre la température du bain d'huile, qu'on notait chaque fois; on fermait r, et l'on ouvrait r'; la vapeur s'échappait par le tube $a a' a''$ et se condensait dans le vase P, de manière à tomber dans la chaudière à la pression barométrique externe B. Après un nombre voulu de décharges, on pesait l'eau de P, dont on avait déterminé le poids initial.

Le poids de la vapeur restant dans la chaudière après chaque décharge a été déterminé de deux façons : 1° Directement par la pesée ; lorsque l'expérience était finie, on laissait les robinets r et r' fermés après la dernière décharge de vapeur; on démontait l'appareil, et on plongeait la chaudière dans un bain de benzine afin d'enlever toute l'huile adhérente ; on ouvrait l'un des robinets, et lorsque la chaudière avait pris la température de l'air ambiant, on pesait, puis on séchait l'intérieur aussi parfaitement que possible à l'aide d'un soufflet, en chauffant un peu, et on repesait dans les mêmes conditions de température ; 2° le poids de la vapeur à la pression B et à la température T, après chaque décharge, était aussi trouvé très-aproximativement à l'aide de la formule

$$\pi = \frac{28,85}{1698}(1 + bT)\frac{B}{0,76}\frac{(1 + a\,100^{\circ})}{(1 + aT)}$$

en posant aussi $b = 0,000051$ et $a = 0,00366$.

En désignant par Π le poids de vapeur condensé dans le vase P, par n le nombre de décharges, on a évidemment

pour le poids total de la vapeur contenue dans la chaudière, à une pression connue et à la température T connue aussi. Le volume de la vapeur, au point de saturation t, était calculé ensuite par la formule

$$\frac{28,85\,(1+b\mathrm{T})}{\mathrm{M}}\cdot\frac{1+at}{1+a\mathrm{T}}=\mathrm{V}.$$

Je crois superflu de donner tous les éléments numériques des diverses expériences que j'ai faites avec ces deux appareils, et je me borne à en donner les résultats définitifs.

1° Le premier instrument m'a donné les nombres suivants pour les volumes de la vapeur saturée :

Pressions.		Volumes, par rapport à l'eau.
$2^{at.}\,{}^1/_2$ =	618,7	731
$3^{at.}\,{}^3/_4$ =	434,5	506
$4^{at.}\,{}^1/_4$ =	374,2	451

Le second m'a donné :

Pression.	Volume.	V. tabulaire.
$4^{at.}\,{}^1/_4$ =	422	451
$5^{at.}$ =	355	388,2

Le volume 355 a été tiré de six expériences dont les résultats divergeaient d'ailleurs très-peu entre eux (de 351 à 357), et où pourtant j'ai à dessein fait varier la surchauffe de la vapeur de

$$153^\circ + 4^\circ \text{ à } 153^\circ + 20^\circ,$$

c'est-à-dire de 4° jusqu'à 20° au-dessus de la température de saturation. J'en dirai à peu près autant du chiffre 422.

Les volumes donnés par ces deux méthodes diffèrent de ceux des tables, comme on voit ; de plus, le volume qui répond à $4^{at.}$ et ${}^1/_4$ diffère beaucoup d'une méthode à l'autre.

Lequel mérite le plus de confiance? Et l'un ou l'autre doit-il être rejeté entièrement comme faux?

Si je m'appuyais sur la régularité des résultats que m'a donnés la seconde méthode comparée à l'irrégularité de ceux de la première, je dirais que ces derniers sont vicieux et ne sont pas même l'expression approximative des faits. Cependant je ne crois pas être en droit de trancher d'une manière aussi décisive.

D'après l'exposé de mon procédé, je ne crois pas qu'on puisse admettre que de l'eau ait été entraînée directement dans la chaudière à *a a a*; il ne me semble pas non plus que la température des parois de cette chaudière puisse différer le moins du monde de celle de la vapeur qui l'enveloppe. M. Regnault, qui a eu la bonté de me donner des détails sur ses propres recherches, et qui a aussi observé de grandes irrégularités en opérant sur la vapeur exactement saturée, pense que l'attraction moléculaire des parois doit intervenir d'une manière assez énergique pour déterminer une condensation partielle d'une vapeur qui se trouve sur la limite de la température nécessaire à son existence gazeuse. L'opinion de M. Regnault est certainement fondée ici. Les irrégularités observées prouvent que de telles condensations ont lieu, et qu'en tous cas le premier appareil que j'ai employé est tout-à-fait impropre à donner des chiffres définitifs. J'admettrais même sans hésitation que l'action seule des parois eût pu donner lieu à l'énorme différence de 374 à 422 qui existe entre le volume de la vapeur à $4^{at.}\frac{1}{4}$ obtenu avec les deux appareils, si un jaugeage d'un tout autre genre et fait sur une immense échelle ne m'avait conduit au nombre 434 que la première méthode indiqué pour la vapeur $3^{at.}\frac{3}{4}$.

En effet la machine Woolf, sur laquelle j'ai fait les expériences consignées au tableau D, consommait $0^{k.},825$ de vapeur saturée par double coup de piston; le volume de cette double cylindrée était $358^{lit.},2$. Or la pleine pression, *constante pour toute la course du petit piston*, était de $3^{at.},75$, à ($\frac{1}{20}$) en moins, et le petit cylindre était enveloppé de vapeur à $3^{at.},75$. Or le rapport

$$\frac{358,2}{0,825} = 434.$$

devait donc être très-sensiblement le volume de la vapeur saturée à $3^{at.},75$ — ($^1/_{20}{}^{at.}$). Une telle concordance entre des expériences faites par des procédés si différents ne me semble pas pouvoir être attribuée au hasard.

Je suis très-loin d'en conclure cependant que le chiffre 434 exprime bien réellement le volume de la vapeur saturée à $3^{at.},75$, et je pense que ce volume doit être notablement trop faible; mais il me semble aussi que tous ceux qui ont été trouvés à l'aide du premier appareil doivent être au contraire un peu trop forts.

La régularité des résultats prouve bien ici qu'à partir de 4° au-dessus du point de saturation, la vapeur se dilate d'une manière sensiblement constante; mais il n'est pas impossible que le coefficient de dilatation croisse fortement vers le point de saturation, et c'est ce qui expliquerait pourquoi le volume, trouvé par un calcul de réduction pour la vapeur à $4^{at.}{}^1/_{20}$ étudiée à 8° au-dessus du point de saturation, diffère tant du volume 374 trop faible, trouvé directement sur la vapeur saturée.

NOTE B.

CHALEUR RENDUE PAR LA CONDENSATION DE LA VAPEUR LANCÉE SOUS FORME DE JET DANS UN ESPACE OU ELLE EST BRUSQUEMENT RARÉFIÉE.

Je crois devoir décrire minutieusement l'appareil qui m'a servi à ce genre d'expériences, afin que chacun puisse juger si le phénomène signalé dans le texte dérive, comme je le pense, d'une loi générale, ou s'il n'est que le résultat d'un *accident*.

T T T' T', tambour cylindrique en tôle mince de 0m.,3 de diamètre sur 0m.,4 de hauteur (fig. 1, Pl. VII).

C C C C, condenseur en tôle muni :

1° A sa partie inférieure qui se termine en entonnoir, d'un tuyau de sortie *t t'* qui va s'engager dans un flacon *f f*; 2° à sa partie inférieure et latérale, d'un tuyau large et coudé *b b' b''* qui s'élève au-dessus du couvercle du tambour; 3° enfin à sa partie latérale supérieure, d'un tuyau large et droit *d d'*, qui sort par le flanc du tambour et qui est pourvu à son orifice d'une plaque percée d'un trou circulaire.

Le tambour en tôle, ou calorimètre, est fermé par un couvercle muni de trois tubulures : 1° deux petites qui donnent passage à un thermomètre et à la tige d'un agitateur ; 2° l'autre, plus large, où s'engage concentriquement l'extrémité du tuyau *b b'*. Un petit gobelet renversé *g g* s'engage dans la partie annulaire laissée entre le tuyau et la tubulure, plonge un peu dans l'eau du tambour, et intercepte toute communication directe du condenseur avec l'air.

Le tambour T T T' T' est placé dans une caisse spacieuse E E E' en bois, qui le préserve contre tout rayonnement externe.

Cette caisse, ouverte en E' E', peut glisser parallèlement à elle-même en arrière et en avant sur deux patins, et venir s'appliquer contre le madrier vertical PP de manière à être fermée sur les quatre faces.

V V, tuyau en cuivre de 0m.,04 de diamètre, amenant de la vapeur saturée et surchauffée au tube en équerre *s s'*.

Ce tube est terminé en tronc de cône, dont la base *l* est percée d'une ouverture circulaire de 0m.,0015 environ ; il est enveloppé d'un manchon en ferblanc *m m m m*; il porte en arrière un petit tube interne qui s'arrête en O et qui permet l'introduction d'un thermomètre ; il traverse exactement une ouverture percée dans le madrier PP. Lorsque la caisse qui renferme le tambour est poussée en avant, le tronc de cône s'engage en partie dans la plaque annu-

laire qui forme l'ouverture d' du condenseur. Du mastic de minium placé à l'avance sous forme de collier autour du cône permet de rendre la fermeture hermétique.

L'expérience à l'aide de cet appareil était très-simple.

On donnait la vapeur au tuyau souffleur, on la lançait dans l'air libre jusqu'à ce que le thermomètre indiquât une température constante ; le calorimètre, totalement rempli d'un poids connu d'eau froide, était placé avec sa caisse sur les patins ; une planche large et épaisse était tenue contre l'orifice souffleur, afin qu'on pût noter exactement la température initiale de l'eau et l'observer pendant un temps voulu ; puis on poussait rapidement la caisse en avant, on écartait l'écran et le souffleur pénétrait dans l'ouverture du condenseur ; on agitait l'eau du calorimètre, on laissait en général durer l'expérience jusqu'à ce que l'eau eût pris autant de degrés au-dessus de la température de l'air qu'elle en avait d'abord en moins ; on retirait la caisse et l'on interposait vivement l'écran ; on notait la température au bout de $1^{min.}$, puis au bout de $10^{min.}$.

Dès que la caisse était reculée, on retirait le flacon ff, on prenait la température de l'eau de condensation qui s'y était réunie et que l'on pesait ensuite avec le flacon dont le poids était déterminé à l'avance. Comme une partie de l'eau condensée pouvait rester dans le candenseur, on pesait tout l'appareil à la fin de l'expérience.

Avec l'ensemble des données précédentes, il est aisé de tirer de l'expérience des résultats numériques exacts.

Le calorimètre vide et sec pesait $5^{kil.},075$. Il représentait donc à fort peu près $0^{kil.},56$ d'eau. Le poids d'eau qu'il renfermait était toujours de $25^{kil.}$ (à $0^{gr.},1$ près). Le poids d'eau total est donc $25^{kil.},56$. Cette eau s'échauffait de i à f ; si elle n'avait ni gagné ni perdu accessoirement de calorique par les parois du tambour, on aurait

$$Q = 25,56\,(f - i)$$

pour le nombre de calories reçues de la vapeur. La température finale f se relevait au bout de $1^{m.}$ et le refroidissement était ob-

servé 10$^{m.}$. Comme pour un excès de 25°, il n'était que de 0°,55 en 10$^{m.}$, on peut le regarder comme constant pour cette période; d'où il suit qu'on avait.

$$f = f' + \frac{D}{10}$$

D représentant la chute de température en ces 10$^{m.}$.

Le flacon librement suspendu au bas du calorimètre et recevant l'eau condensée, pesait 0$^{k.}$,878. Il représentait donc à très-peu près 0$^{k.}$,878. 0,18 = 0$^{k.}$,158 d'eau. Au commencement de l'expérience il était à la température a de l'air ambiant; à la fin, il possédait la température t' de l'eau qui s'y était rassemblée. Il avait donc pris

$$0{,}158\,(t' - a)^{\text{calor.}}$$

Et si nous nommons p le poids de la vapeur condensée, on a

$$q = 0{,}158\,(t' - a) + p\,t'$$

pour le nombre de calories que céderait l'eau condensée si on la suppose ramenée à 0°.

Nous avons donc en somme

$$Q + q + q' = x = p\,(606{,}5 + 0{,}305\,t + 0{,}4805\,(T - t))$$

pour relation entre la quantité de calorique cédée par la vapeur à l'eau, et celle qu'il a fallu dépenser pour produire le poids p de vapeur surchauffée de la température de saturation t à T; x exprimant l'excès en plus ou en moins du dernier nombre sur le premier, et q' étant le nombre de calories gagnées ou perdues par l'appareil, par suite de son contact avec l'air, etc.

Pour déterminer q', j'ai pu admettre sans trop d'erreur : 1° que l'échauffement ou le refroidissement de l'appareil était proportionnel à l'excès négatif ou positif de sa température sur celle de l'air; ou autrement dit, qu'en un temps $d\,t$ on avait sensiblement

$$dq' = 25{,}56\,R\,(\Theta - a)\,dt$$

2° que l'élévation de la température Θ était proportionnelle au temps et indépendante de l'action de l'air ambiant.

Considérée en elle-même, cette hypothèse est absurde ; mais comme l'expérience durait rarement plus de 16 à 20$^{mi.}$ et que pour un excès de 25° le refroidissement était à peu de chose près $\frac{0,5}{1^o}$ on peut en effet poser sans crainte d'erreur

$$\Theta = b\,t, \text{ d'où}$$

$$q' = 25^{gr},50\,\mathrm{R}\int (b\,t - a)\,dt.$$

En désignant par D la durée de l'expérience, par Θ la température $(f - i)$ gagnée, par $\alpha = (a - i)$ l'excès négatif initial sur l'air ambiant, par R le refroidissement par minute pour un excès d'un degré, et en intégrant depuis $t = 0$ jusqu'à $t = \mathrm{D}$ et observant que $b = \Theta : \mathrm{D}$, il vient en résumé

$$q' = \mathrm{P\,R\,D}\,(\tfrac{1}{2}\Theta - a).$$

En me servant de cet appareil, je n'ai pas tardé à reconnaitre que pour arriver à des résultats réguliers, l'emploi de vapeur surchauffée légèrement est indispensable. Or, dans ce cas, et en ayant recours en outre aux considérations suivantes, il est visible que je n'ai pu trouver qu'un minimum de calorique pour la vapeur. En effet :

1° La température de la vapeur était prise en arrière de son entrée dans l'appareil, et elle ne pouvait que se refroidir jusqu'à l'orifice souffleur, 1° par le contact du tuyau avec le calorimètre, et cette chaleur était mesurée ; 2° par contact du tuyau avec l'air, et cette portion était perdue.

2° La température de l'eau condensée et réunie dans le flacon était prise à la fin de l'expérience, où dès le commencement elle était supérieure à celle de l'air ambiant. Il y avait donc là une perte légère qui échappait à l'observation.

3° On a $q' = o$, lorsque dans la formule de correction on pose $\frac{1}{2}\Theta = a$, c'est-à-dire lorsqu'on termine l'opération avec un excès

positif de température précisément égal à l'excès négatif initial. Or il est évident que, dans ce cas pourtant, l'appareil met un peu plus de temps à passer de a à f qu'il n'en a mis à passer de i en a. La formule indique donc toujours des chiffres trop faibles pour q'.

Eh bien, malgré toutes ces causes de déficit, la vapeur surchauffée d'une trentaine de degrés et condensée sous la pression atmosphérique a toujours donné pour x des valeurs très-notables. Ainsi, pour citer des chiffres, avec de la vapeur à 5at. chauffée à 170° ou 180°, on trouve $x = 25^{cal.}$. Dans les expériences où je suis parvenu à tenir la vapeur à quelques degrés seulement au-dessus de 153°, le minimum de valeur pour x a été 16cal.

En un mot, la vapeur à 5at. lancée sous forme de jet dans un espace où elle se raréfie et se condense ensuite sous une pression constante, donne des quantités de calorique supérieures de 16cal. à 25cal. au nombre

$$606,5 + 0,305\, t + 0,4805\, (T - t) = Q$$

qu'elle a coûté pour se produire.

Ces expériences calorimétriques en petit se trouvent confirmées, comme on verra, sur une vaste échelle, par les recherches consignées à la fin de la note D.

NOTE C.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR LANCÉE SOUS FORME DE JET DANS UN ESPACE OU ELLE EST RARÉFIÉE.

La figure 2, pl. VII, fait comprendre aisément la construction du petit appareil à l'aide duquel j'ai mesuré cette température.

a a a a. Cylindre en cuivre de $0^{m},09$ de diamètre sur $0^{m},12$ de profondeur, fermé à sa base par un disque percé au centre d'une ouverture de $0^{m},002$.

c c c c. Chaudière en cuivre de même forme, mais assez spacieuse pour qu'il reste partout $0^{m},05$ d'intervalle entre les parois concentriques.

b b b b. Cloche en ferblanc de $0^{m},07$ de diamètre concentrique au cylindre *a a a a*, dans lequel elle plonge jusqu'à $0^{m},015$ du fond, fermée par le haut par un disque muni d'une tubulure où pénètre un thermomètre.

Le cylindre *a a a a* est assujetti dans la chaudière *c c c c* à l'aide de brides mastiquées et serrées par des boulons.

Un tube *s s* pénètre dans l'espace annulaire libre entre les deux cylindres et sert à recevoir un thermomètre. Le tuyau *t t* amène dans la chaudière *c c c c* de la vapeur saturée ou surchauffée ; cette vapeur se jette dans le cylindre interne par la petite ouverture percée à la base ; elle s'échappe librement entre les parois de *a a a a* et celles de la cloche *b b b b*. Deux petites ouvertures sont percées aussi en *o* et *o'*, afin que la vapeur se renouvelle assez vite et garde partout la même température dans l'espace où elle est comprimée.

Lorsqu'on amène de la vapeur à 5[at.] dans cet appareil, le thermomètre logé en *s s* monte comme de raison à 153° ; celui de l'intérieur de la cloche se tient entre 141° et 143°. Amène-t-on au contraire de la vapeur surchauffée de telle sorte que le thermomètre en *s s* marque ne fût ce que 154° au lieu de 153°, aussitôt le thermomètre de la cloche monte à 154° juste, et se tient ensuite au pair avec l'autre si la surchauffe s'accroît. C'est du moins ce que j'ai vérifié jusqu'à 157°. Cette égalité me semble mettre les indications données par cet appareil à l'abri de toute critique et conduire au principe que je pose dans le texte. La différence que l'on trouve en se servant de vapeur saturée vient de ce que, dans ce cas, de l'eau est amenée mécaniquement par la vapeur et est jetée avec elle dans l'espace libre où son évaporation abaisse la température de la vapeur détendue.

C'est par cette dernière raison que, dans les essais calorimétriques décrits précédemment, il a été impossible d'essayer la vapeur simplement saturée.

NOTE D.

NOUVELLES EXPÉRIENCES CALOMÉTRIQUES SUR LA MACHINE A VAPEUR.

Dans toutes les expériences décrites au chapitre III, on dosait la vapeur dépensée par coup de piston, en faisant marcher la machine toute une journée au même *régime* et en divisant le poids total de vapeur consommée par le nombre de coups de piston qui y répondait. Cette méthode n'avait d'autre inconvénient que la longueur, lorsque la pompe fonctionnait dans des conditions de rendement convenable. Elle devenait d'une application difficile et dispendieuse lorsque la machine était réduite notablement en détente, et à plus forte raison en eût-il été ainsi pour une pompe totalement dépouillée de détente. Sans parler de la consommation démesurée de combustible à laquelle on arrivait en pareil cas, l'expérience devenait ici d'une difficulté insurmontable ; il me suffira, pour le faire comprendre, de dire qu'un foyer destiné à brûler au plus haut 250k. par heure eût été poussé à 600k..

Par ce motif, et par d'autres encore que je ne mentionne pas, il m'importait donc de trouver une méthode expérimentale qui, sans perdre en rien de son exactitude, fût plus applicable en général et fût ainsi à la portée d'un plus grand nombre de physiciens. Je crois avoir atteint ce but d'une manière satisfaisante.

C'est sur la machine à un cylindre dont il est question (page 25) que la méthode nouvelle a été essayée.

Le condenseur de cette machine consistait en un grand cylindre de 1m·,2 de hauteur sur 0m·,5 de diamètre immergé, ainsi que sa pompe d'aspiration, dans l'eau d'une vaste citerne en maçonnerie, de plus de 15 mètres cubes. La vapeur de la pompe se jetait dans ce cylindre par le côté latéral ; à la même hauteur et à peu près à angle droit avec la direction du jet de vapeur, se faisait l'introduction de l'eau froide par une ouverture munie d'un robinet noyé aussi dans l'eau de la citerne pour le besoin de mes expériences.

1° Cette citerne fut vidée désormais aux neuf-dixièmes et munie d'un trop plein, afin que l'eau froide, qu'y envoyait sans cesse une pompe, ne pût pas s'y élever à plus de 0m,1 ; 2° le robinet d'injection du condenseur, mis ainsi à sec, fut muni d'un tuyau aspirateur plongeant dans l'eau froide ; 3° le condenseur était muni déjà d'un manomètre à mercure pareil à celui des machines pneumatiques ; on y pratiqua, en outre, une ouverture munie d'un robinet, afin de pouvoir injecter de l'air. En raison de la grandeur du condenseur, du bon état d'entretien de la pompe et de la quantité d'eau froide qu'on pouvait injecter, la condensation était instantanée, et le mercure restait parfaitement immobile dans le manomètre. Sa hauteur absolue ne variait qu'avec le régime de la machine. Par le moyen de l'air qu'on introduisait en plus ou moins grande quantité, la hauteur du mercure pouvait être tenue constante pendant toute une série d'expériences. Si nous nommons B la pression barométrique externe, Π la pression restante de la vapeur du condenseur et h la hauteur de l'ouverture d'injection au-dessus du niveau de l'eau froide, il est clair qu'on a

$$((B-\Pi)\,13,595-h)$$

pour la charge *constante* sous laquelle l'eau se jette dans le condenseur, et comme l'ouverture d'injection ne variait pas non plus pendant une suite d'expériences données, il est clair que la quantité d'eau injectée par seconde, par exemple, ne variait pas non plus.

L'eau chaude extraite du condenseur par sa pompe était conduite dans une auge rectangulaire de 1m,5 environ de hauteur, pourvue à sa partie inférieure et latérale d'un ajutage cylindrique et poli en fonte. Un tube en verre adapté au flanc de l'auge indiquait, à 0m,001 près, la charge de l'eau au-dessus du centre de l'orifice.

A l'aide de l'ensemble de cette disposition de la machine, il était aisé de déterminer tous les éléments du problème à résoudre. Voici comment l'expérience était conduite.

On commençait par mettre la machine au régime dans lequel on voulait l'étudier ; l'expérience ne commençait qu'au bout d'une demi-heure au moins de marche à ce régime. Je ne m'arrête pas à développer les motifs de cette précaution ; je me borne à dire qu'elle est une condition *sine quâ non* d'exactitude à laquelle l'observateur le plus impatient ne saurait se soustraire s'il ne veut perdre son temps.

Cette condition remplie, 1° un observateur notait de minute en minute, à 0°,1 près, la température de l'eau chaude à sa sortie de la pompe pneumatique ; 2° un autre notait de minute en minute la hauteur de l'eau dans l'auge ; 3° un troisième tenait note de la température de la vapeur à son entrée au cylindre, de sa pression et de la hauteur du manomètre du condenseur qu'on marquait d'un trait de repère ; 4° un compteur relevait le nombre de coups de piston. Quelque régulière que soit la marche d'une machine, une trentaine de notations est toujours nécessaire pour arriver à une moyenne qui représente bien chaque phénomène étudié.

Cette première expérience bien terminée, on pouvait mettre la machine à un autre régime, à une charge plus faible ou plus forte, à une autre détente, à une autre pression, etc., etc. Tout était répété comme précédemment ; mais de plus, comme la pression du condenseur changeait nécessairement d'une expérience à l'autre, on commençait par celle qui donnait le plus mauvais vide, et dans les suivantes, un quatrième observateur maintenait rigoureusement cette hauteur *maxima* du manomètre en injectant de l'air par le robinet du condenseur.

Quel que fût le nombre des expériences et leur nature, il en était une par laquelle on terminait nécessairement toujours. On faisait marcher la machine à vide, c'est-à-dire sans charge aucune, jusqu'à ce que la température de l'eau du condenseur eût cessé de baisser, et pendant tout ce temps, on notait la hauteur du niveau de l'eau dans l'auge.

Soient maintenant P le poids inconnu d'eau froide injecté par seconde dans le condenseur pendant toute cette suite d'expériences, Π le poids de vapeur consommée par seconde pendant que la machine marchait avec charge, h le niveau moyen de l'eau au-dessus du centre de l'orifice, S la section de cet orifice, et m le coefficient de contraction qui s'y rapporte. On a évidemment :

$$P + \Pi = \delta\, m\, S \sqrt{2 g h : \delta}$$

δ étant la densité de l'eau à la température moyenne observée. Et comme nous pouvons ici sans erreur appréciable faire $\delta = 1$, il vient simplement :

$$P + \Pi = m S \sqrt{2 g h}$$

Pour m S, on aurait pu écrire :

$$0,82\, \Pi\, r^2 = 0,82.\ 3,1416.\ 0^{m},0215^2$$

mais il m'a semblé plus exact de déterminer expérimentalement le produit m S en mesurant ce que débitait l'ajutage sous une charge de 1^{m}, par exemple ; et j'ai trouvé ainsi $m' S = 0^{\overset{2}{m}},001431$. D'où il résulte

$$P + \Pi = 0^{\overset{3}{m}},0063382 \sqrt{h}$$

Désignons maintenant par Π' le poids inconnu de vapeur que la machine consommait en marchant à vide, et soit h' la charge moyenne dans l'auge qui répondait à cette expérience. Soient aussi i et f les températures initiale et finale de l'eau ; par T' la température de la vapeur supposée surchauffée, par t celle qui répond au point de saturation. On a d'abord :

$$P + \Pi = W = 0^m,0063382 \sqrt{h},$$

et puis $(W - \Pi')(f' - i) + \Phi : \Sigma =$

$$\Pi' (606,5 + 0,305\, t' + 0,4805 (T' - t') - f')$$

Équation où W, f', i, t', T', sont des données expérimentales connues à chaque fois, et que nous pourrons résoudre par rapport à Π', lorsque nous connaîtrons $\frac{\Phi}{\Sigma}$ ou le quotient de la force consommée par la machine elle-même, divisée par l'équivalent mécanique.

J'ai déterminé très-approximativement Φ à l'aide de l'expérience citée page 58, chapitre III, en observant en combien de temps les frottements annulent l'impulsion du volant dont le moment d'inertie et par suite aussi la force vive sont faciles à déterminer.

Bien que d'après mon opinion Σ soit une variable, j'ai admis le nombre 432 km. pour diviseur, puisqu'il ne s'agit ici que d'une correction de peu d'importance.

Connaissant Π', nous déterminons P avec l'équation :

$$W - \Pi' = P$$

Et enfin Π à l'aide de l'équation

$$0^m,0063382 \sqrt{h} - P = \Pi$$

Si nous désignons maintenant par T la température de la vapeur pendant le travail de la machine, par t la température au point de saturation, par i et f les températures de l'eau injectée et rejetée, et par x le nombre de calories qui disparait par suite du travail, nous avons

$$C + P(f - i) + x = (606,5 + 0,305\, t + 0,4805 (T - t))\, \Pi$$

C étant la correction que nécessitent les pertes accessoires de calorique éprouvées par le cylindre et le bénéfice de calorique dû aux divers frottements, etc.

C'est à l'aide de cette méthode expérimentale et à l'aide des données numériques directes ou indirectes qu'elle a fournies, qu'ont été déterminés les nombres des expériences du tableau D.

Les expériences 13 à 21 se rapportent à la machine marchant avec détente ; on voit comme les résultats finaux s'accordent de près avec ceux des expériences qui ont été faites, il y a fort longtemps, sur la même machine placée à peu près dans les mêmes conditions dynamiques. Si l'on songe à la différence radicale des deux méthodes employées, on aura certainement lieu de regarder au moins comme très-approximatifs les nombres ainsi obtenus.

Il me reste à discuter en détail les trois espèces d'expériences très-distinctes et très-importantes que j'ai pu faire à l'aide de cette nouvelle méthode ; et dont il eût été impossible de rendre convenablement compte à l'aide des seuls chiffres d'un tableau.

1° La première espèce concerne la machine sans détente et constitue, je le dis sans crainte d'exagération, ce que le physicien peut rencontrer de plus difficile dans la science expérimentale.

En premier lieu, il faut remarquer que le terme de *machine sans détente* ne peut s'appliquer qu'au mécanisme de cette machine et jamais à ce qui a lieu réellement pour la vapeur. La pompe à un cylindre, dont il est question dans ce travail, pouvait être privée entièrement d'un instant à l'autre de son mécanisme de détente, et la vapeur affluait alors continuellement dans la boîte du tiroir de distribution. Mais pour quiconque a étudié attentivement les fonctions des tiroirs distributeurs, il sera clair que notre machine ne formait pas pour cela une machine où la vapeur n'éprouvait aucune détente pendant son travail, et il sera clair aussi que la détente, inévitable de fait, variait avec la densité de la vapeur, et par suite avec le degré de la surchauffe. En toute hypothèse, il était donc impossible d'arriver à des résultats d'une régularité satisfaisante dans de telles conditions.

En second lieu, la détermination du poids de vapeur consommé par la machine à vide, qui était facile dans tous les autres cas, devait être ici d'une difficulté extrême, et cette difficulté retombait ensuite sur l'appréciation du poids dépensé pendant le travail.

En effet, le vide est d'autant meilleur, toutes choses égales, dans le condenseur d'une machine, qu'il afflue moins de vapeur en un temps donné. Lorsque notre machine travaillait avec détente, la pression s'élevait à $0^{m}.03$ (en mercure) à peine ; elle montait à $0^{m}.11$ lorsqu'on marchait sans détente ; elle tombait à $0^{m}.035$ lorsque la machine marchait à vide et sans air injecté. Il fallait donc introduire des quantités d'air relativement très-grandes pour maintenir la pression première $0^{m}.11$. Cet air, qui conservait toute sa température par suite de son passage brusque à $0^{m}.11$, s'échauffait donc ensuite lorsque la pompe du condenseur le ramenait à $0^{m}.74$ par l'expulsion ; *et il devait chauffer l'eau de toute la quantité que représentait le travail que nécessitait cette expulsion*. Et comme la température de cette eau servait à évaluer la consommation en vapeur de la machine à vide, il s'ensuit qu'on était exposé à évaluer trop haut aussi la consommation de la machine à l'état de travail et à exagérer le déchet de calorique à constater.

Malgré ces chances d'erreur en moins, quant au calorique retrouvé, le déchet de calorique par seconde variait de 0 à $10^{cal.}$ d'une expérience à l'autre, lorsque la machine, dépouillée de son mécanisme de détente, était alimentée de vapeur à $2^{at.}$ surchauffée entre 160° et 200°, et rendait environ 80 chevaux de force effective (soit environ $8000^{k.m.}$ de travail disponible).

En admettant même le plus haut chiffre ou $10^{cal.}$, on voit que l'équivalent doit s'élever à $800^{k.m.}$

A défaut de toute autre expérience, on serait déjà en droit de conclure ici que le déchet trouvé provient d'un reste de détente que subissait la vapeur. Toutefois les expériences suivantes me semblent bien plus décisives encore.

2° Dans les expériences dont je parle maintenant, la machine à un cylindre travaillait *à une force constante*, avec diverses détentes. Quelles déductions peut-on tirer de telles expériences ?

C'est ce qu'il est aisé de pressentir.

D'après la théorie mécanique de la chaleur, une pompe donnant

une force constante doit donner un déchet de calorique constant, quelles que soient la détente, la pression, la surchauffe, etc. etc., de la vapeur. De telle sorte qu'en nommant N le nombre de calories dépensées à vaporiser l'eau, N' le nombre qu'on retrouve dans l'eau de condensation, Σ l'équivalent mécanique et Φ le travail disponible de la vapeur dans le cylindre, on ait

$$\Phi : \Sigma = N - N',$$

quelles que soient les valeurs absolues de N et de N'.

Mais en nommant Π la dépense de vapeur par unité de temps, P la quantité d'eau froide injectée au condenseur, t la température de la vapeur au point de saturation, T la surchauffe, i la température de l'eau injectée; f celle de l'eau rejetée, on a

$$N = (606,5 + 0,305\,t + (T - t)\,0,4805)\,\Pi$$

$$N' = P(f - i)$$

$$(606,5 + 0,305\,t + 0,4805\,(T - t) - f)\,\Pi - P(f - i) = \Phi : \Sigma. \quad (1)$$

Et la théorie dit que si, laissant T, t, i, f constants, on fait varier Π, f' variera de telle sorte que nous ayons toujours

$$\Pi\,(606,5 + 0,305\,t + 0,4805\,(T - t) - f') - P(f' - i) = \Phi : \Sigma. \quad (2)$$

Nous disposons donc ici d'un moyen expérimental précis pour arriver à confirmer ou à réfuter la proposition la plus fondamentale de la théorie mécanique moderne de la chaleur, et, en dehors de toute théorie, pour reconnaître à quelle période de l'action de la vapeur est dû le déchet de calorique trouvé dans l'eau de condensation. La machine qui me servait se prêtait admirablement à ce genre d'étude. Le travail produit restant constant à $^1/_{10}$ près, on pouvait admettre la vapeur en pleine pression pendant $^1/_7$ de la course du piston seulement, ou pendant les $^{100}/_{125}$: dans ce dernier cas, le robinet d'introduction servait à maintenir la constance de la force produite. On avait donc ainsi un moyen de faire varier Π, sans rien altérer à la marche de la machine. Supposons maintenant que Φ : Σ soit en effet une constante; supposons aussi que nous main-

tenions T, t, P, invariables (ces conditions étaient faciles à remplir en réalité), posons

$$606,5 + 0,305\,t + 0,4800\,(T - t) = A$$

et puis retranchons (1) de (2).

Expérimentalement nous connaissons seulement les poids d'eau W et W' rejetés par le condenseur dans les deux cas; mais comme

$$P + \Pi = W \text{ et } P + \Pi' = W',$$

nous avons

$$W' - W = \Pi' - \Pi$$

pour la différence *connue* des deux dépenses successives de vapeur.

Posons $\Pi' - \Pi = \delta$, d'où $\Pi' = \Pi + \delta$. Il vient

$$(\Pi + \delta)(A - f') - P\,(f' \ldots) = [\text{illegible}]\ (\delta + \Pi)$$

$$\text{d'où } \Pi + P = W = \frac{[\text{illegible}]}{(A - [\text{illegible}])} \qquad (3)$$

Si l'expérience ne confirme point cette égalité, nous serons en droit d'en conclure positivement que $\Phi : \Sigma$, ou plutôt que Σ ne peut être considéré comme un nombre stable, ou comme l'équivalent *correctement calculé*.

Je cite au hasard les données numériques de deux expériences consécutives.

On avait pour les deux

$\Phi = 9500^{k.m.}$ (environ), $t = 9°$, $T = 203°$, $t' = 145°$ (vapeur à $4^{at.}$), d'où $A = 680°,43$.

La machine marchant avec une détente de 1 à 7, on avait

$$f = 31°,4\ ;\ W = 6^{kil.},52095.$$

Avec la détente 1 à 1,25, on a eu

$$f' = 40^{\circ},35 \text{ et } W' = 6^{k},57195$$

D'où il résulte pour l'excès de W' sur W = 0^kil,0510225

et en mettant ces valeurs dans l'équation (3)

$$W = \frac{0,0510225\,(680,43 - 40,35)}{40,35 - 31,4} = 3^{k},649$$

Nous voyons que la valeur calculée pour W ou $3^{k},649$ diffère si considérablement de la valeur expérimentale $6^{k},52093$, qu'il est impossible d'invoquer ici des fautes d'observation. J'ai dit d'ailleurs que je cite au hasard. Plus de cinq expériences ont marché dans le même sens général.

Nous ne pouvons donc à aucun titre poser

$$I = \text{const.} = 9500^{k} : 432 = 21^{cal},99$$

au cas particulier de notre expérience.

Lorsque la machine marchait à la force indiquée et avec son maximum de détente, on avait à très-peu près $16^{cal.}$ de déficit par seconde. Il en résulte

$$x(680,43 - 31,4) - (6,52093 - x)(31,4 - 9) = 16^{cal}$$

$$\text{d'où } x = 0^{k},238.$$

La machine marchant à $4^{at.}$, robinet d'admission tout ouvert, et détente *maxima*, consommait en effet à très-peu près $0^{k},239$ de vapeur à 200° par seconde. Puisque nous avons trouvé

$$W' - W = 0^{kil.},0510225,$$

la dépense s'élevait, comme on voit, à $0^{k},290023$, lorsqu'on réduisait la détente et qu'on étranglait l'orifice d'entrée, de manière à tenir la force constante.

Si nous substituons ces données numériques dans l'équation (2), en remarquant que

$$P = W = 6^k,52093 - 0,239023 = 6^k,28191,$$

elle devient

$$\Sigma : \Phi = 0,29003\,(686,45 - 40,35) - 6,28191\,(40,35 - 9) =$$

$$197^c,34 - 196^c,94 = 0^c,4$$

Ainsi donc, dans ces conditions la machine donnait à peine 0,4 de déchet de calorique par seconde, et pourtant elle marchait avec une détente très-notable ! Ce résultat semble d'abord contradictoire avec ce qui précède. Au fond, il ne l'est pas du tout, et confirme au contraire pleinement l'ensemble des expériences rapportées dans ces notes.

Lorsqu'on veut diminuer la détente d'une machine sans altérer la valeur du travail mécanique qu'elle rend, il faut nécessairement diminuer la pression de la vapeur dans le cylindre pendant la période d'admission ; or nous avons deux manières d'arriver à ce résultat. Nous pouvons laisser tomber la pression dans la chaudière et laisser alors le robinet d'admission ouvert de manière à ce que la vapeur afflue librement et sans grand changement de pression à son entrée. Nous pouvons aussi laisser la vapeur tendue et diminuer l'ouverture d'entrée ; une partie de la pression initiale est alors employée à donner au gaz aqueux un surcroît de vitesse à son passage par le robinet ; et dans le cylindre la pression est diminuée de fait comme il convient. Entre ces deux procédés, il existe une différence radicale, au point de vue du calorique retrouvé dans l'eau de condensation. Dans le premier cas, nous devons trouver une perte notable en raison de la détente, si faible qu'elle soit, qu'éprouve encore la vapeur après son action en pleine pression. Dans le second cas, la vapeur se précipite d'une enceinte où elle est comprimée dans une autre où elle l'est moins ; la vapeur ainsi admise représente donc dès ce moment plus de calorique que n'en indique la formule

$$Q = (606,5 + 0,305\,t - 0,4805\,(T - t))$$

et ce surcroît compense le déchet qu'occasionne ensuite la détente.

Les résultats de ces expériences nous montrent clairement qu'une machine à vapeur qui serait réellement sans détente, non seulement ne nous donnerait pas de déchet de calorique, mais pourrait même nous donner un léger bénéfice; il suffirait pour atteindre ce but, de tendre à 5 ou $6^{at.}$ la vapeur du générateur et d'étrangler l'entrée dans le cylindre de manière à ce qu'elle travaillât à $1^{at.}$.

5° Les expériences dont il me reste à parler ne sont qu'une répétition en grand des essais calorimétriques décrits dans la note B.

Devant des résultats aussi singuliers, aussi bizarres même que ceux auxquels m'avaient conduit ces essais, j'avoue que je suis plus d'un fois resté dans le doute sur la validité de mes expériences; il m'importait au plus haut point de les confirmer sous une autre forme, pour sortir du doute. En partant d'un point de vue tout personnel, je ne pouvais me dissimuler que, par suite de mes recherches sur des machines à vapeur de grande force, j'avais plus l'habitude des appareils de physique de dimensions colossales que de ceux de cabinet: il pouvait ici m'échapper maintes erreurs que là j'avais appris à éluder.

Dans des expériences calorimétriques faites en petit, les pertes ou les accroissements de chaleur dus aux parois, les communications de chaleur de tous genres, etc., sont autant de sources d'erreur contre lesquelles le physicien est sans cesse obligé de se tenir en garde. En grand, ces causes d'erreur perdent de leur importance relative. On conçoit en effet que des causes de trouble, fort importantes lorsqu'il s'agit d'une expérience où l'on condense par exemple 1 lit. de vapeur en une demi-heure, cessent d'être à considérer lorsque nous condensons 200 lit. dans le même temps. En disposant la machine à un cylindre convenablement, il m'était facile de la faire servir à de telles recherches.

Au couvercle du condenseur de cette machine, j'adaptai un robinet de $0^{m^2},0003$ de section qui fut mis, par un gros tuyau de cuivre, en rapport avec la conduite de vapeur du cylindre. Je pouvais ainsi lancer dans ce condenseur un jet de vapeur à une tension et à une température constantes connues.

L'évaluation de la dépense de vapeur était des plus faciles. La machine, pendant l'expérience, marchait à vide et à sa vitesse normale. Le poids de l'eau qui arrivait dans le cuveau de jauge, que j'ai décrit, se composait : 1° du poids de l'eau injectée ; 2° de la vapeur consommée par la machine ; 3° enfin du poids de la vapeur injectée. On notait pendant une demi-heure, de minute en minute, la hauteur de cette eau dans l'auge, et sa température. Puis on fermait le robinet d'injection de vapeur, on laissait marcher la machine au même régime, en maintenant rigoureusement la même pression dans le condenseur ; et l'on notait encore pendant une demi-heure la température et la hauteur de l'eau expulsée.

La différence des deux hauteurs successives donnait la dépense du jet de vapeur, puisque le poids d'eau injectée restait constant. La différence des deux températures indiquait le surcroît de degré dû à la vapeur injectée directement au condenseur. Toutes les corrections à faire ici à la somme de calorique trouvée sont additives. En effet :

1° La température de la vapeur était prise assez loin de l'ouverture d'injection : il ne pouvait y avoir que perte depuis le thermomètre jusqu'au condenseur.

2° Le condenseur et sa pompe étaient à nu : il ne pouvait y avoir que perte de calorique, et cette perte était d'autant plus grande que les deux récipients étaient plus chauds.

3° Le frottement du piston développait de la chaleur ; mais celle-ci était la même pour les deux expériences. Cependant lorsque le jet de vapeur était arrêté, il fallait injecter un peu d'air pour tenir la contre-pression constante : cet air échauffait nécessairement l'eau rejetée, et la différence des températures consécutives devenait trop faible.

Eh ! bien, malgré toutes ces causes d'erreur en moins, avec l'énorme dépense de $0^{k},12$ par seconde en vapeur, les résultats de cette expérience calorimétrique ont constamment marché dans le même sens que ceux des expériences de la note B ; et la vapeur

condensée a toujours rendu plus de chaleur que n'en indique la formule de dépense

$$Q = 606,5 + 0,305\,t.$$

Je dirai que l'excès trouvé ici surpassait même celui de l'expérience en petit ; et il en devait être ainsi en raison de l'accroissement de la différence des pressions, qui déterminait le passage du gaz aqueux dans le condenseur.

Tout l'ensemble des faits qui viennent d'être exposés nous montre combien est compliquée l'étude des fonctions de la vapeur, au point de vue physico-mécanique, et combien les circonstances les moins importantes en apparence sont de nature à modifier souvent les résultats que l'on cherche à obtenir. Il me paraît expliquer mieux que tout raisonnement *a priori* les irrégularités des nombres qui, dans mes tableaux, répondent à l'équivalent mécanique, calculé en rapportant la disparition d'un partie du calorique, soit *du travail total*, soit au travail *dû à la détente seulement*.

Le fait saillant de mes recherches, *si elles sont justes*, c'est qu'il est possible, par de très-légères modifications apportées dans l'emploi de la vapeur, de faire sortir d'une machine, *même à détente*, *moins* de calorique, *autant* de calorique ou *plus* de calorique qu'on n'y en envoie. Toute théorie mécanique de la chaleur aura désormais à compter avec ce fait, *s'il se vérifie* entre les mains d'autres physiciens, et à l'aide de méthodes plus parfaites que les miennes.

Je dis : « *s'il se vérifie* », je dis, en parlant de mes recherches : « *si elles sont justes* ». En terminant la partie expérimentale de mon travail, il me semble de mon devoir de faire ici quelques réserves.

Plus d'un lecteur, je pense, trouvera que dans les deux chapitres suivants, j'affecte une forme singulièrement hardie et tranchante ; j'espère que les mêmes lecteurs auront éprouvé un sentiment précisément opposé, en étudiant les chapitres précédents. Le métaphysicien, *qui ne fait que méditer et raisonner*, peut se permettre d'affirmer d'un ton décisif ; il doit même le faire, s'il ne veut pa-

raitre diffus et obscur; car il peut être certain que ses affirmations, si elles sont fausses, seront bientôt renversées par d'autres raisonneurs, et qu'elles ne peuvent par suite en rien nuire au progrès réel de la science.

L'expérimentateur au contraire, qui sait combien il est difficile d'arracher à la nature ses secrets lorsqu'on substitue l'observation directe à l'œuvre de l'imagination, l'expérimentateur, qui sait qu'il se trompe à chaque instant comme tout homme, et plus que tout autre homme, ne peut se permettre de trancher là où même il se croit le plus sûr de ses résultats, s'il ne veut nuire à la vraie science. J'ai insisté le moins possible sur la valeur absolue des nombres auxquels je suis arrivé; je ne les présente que comme de premières approximations, que des mains plus habiles modifieront et rectifieront sans doute. J'insiste plus sur le sens général de ces nombres, et des phénomènes qu'ils traduisent. Disposé par caractère, comme tout homme sensé doit l'être, à m'effrayer plutôt qu'à m'applaudir de ce qui heurte les idées généralement reçues comme justes, et me trouvant en face de faits qui affectent au plus haut point le caractère de paradoxes et de bizarreries, j'ai redoublé de soins comme observateur. On a vu d'ailleurs qu'il s'agit d'une série de phénomènes très différents entre eux, et vérifiés par des méthodes tout aussi différentes : les chances d'erreurs graves sont donc diminuées de beaucoup. Cependant de telles chances existent toujours, et je ne puis qu'émettre le vœu de voir bientôt mes recherches contrôlées par des procédés rigoureux. S'il devait être prouvé que je me suis radicalement trompé en tous points, j'aurais du moins encore la satisfaction d'avoir, par mes fautes mêmes, hâté la découverte de la vérité, et je dirais à mes pairs : « que celui d'entre vous qui n'a point commis d'erreurs me jette la première pierre ! »

CHAPITRE X.

RÉFLEXIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉQUIVALENCE RÉCIPROQUE DES FORCES.

En ce qui concerne l'étude de l'équivalent mécanique de la chaleur, je me suis borné jusqu'ici exclusivement à exposer des faits, et à conclure de ces faits appréciés d'abord dans leur validité expérimentale un autre fait qui s'y trouve écrit clairement : c'est que l'équivalent mécanique ne saurait être regardé comme un nombre absolu et constant. Plus d'une raison m'a engagé à me tenir dans une telle réserve au début de ce travail.

A un point de vue personnel d'abord, je me suis efforcé pendant tout le cours de mes recherches, d'éloigner de mon esprit les opinions préconçues, persuadé que de fausses théories ne conduisent que trop souvent à de mauvaises expériences ; l'observateur le plus scrupuleux est, en effet, entraîné parfois à porter son attention trop exclusivement du côté qui fait ressortir l'idée qu'il *caresse*.

Au point de vue de la narration même, j'ai pensé qu'on ne saurait séparer avec trop de soin les faits proprement dits des inductions les plus légitimes, de crainte d'exposer le lecteur à confondre les données positives de l'expérience avec leurs déductions apparentes ou réelles, et de regarder ainsi comme sujet à doute ce qui est prouvé, ou d'accepter ce qui au contraire n'est qu'hypothèse.

Les résultats, d'ailleurs, auxquels je suis arrivé, semblent en désaccord avec ceux qu'on avait généralement déjà acceptés comme vrais : je me permets de dire qu'ils semblent. Le désaccord, en effet, porte beaucoup moins sur des faits recueillis réellement par d'au-

des expérimentateurs que sur les faits qu'on a, en quelque sorte préconçus comme positifs.

Ces résultats, en tous cas, nous amènent promptement à cette conviction que nous sommes encore fort loin de l'époque où l'on pourra fonder une théorie rationnelle, exacte et mathématique de l'ensemble des phénomènes que détermine le calorique.

Je le répète, j'ai donc cru agir sagement en m'abstenant de la moindre réflexion critique, de la moindre considération supérieure ou accessoire, comme on voudra, à l'expérience.

Une telle réserve, cependant, poussée trop loin, ne laisse pas que d'avoir aussi des inconvénients très-graves. La question de l'équivalent plus que toute autre, en effet, implique pour ainsi dire forcément une opinion quelconque chez l'expérimentateur le plus sceptique en fait de théories. Et l'on peut dire que celui qui affecterait une indifférence totale à l'égard des conséquences philosophiques, compromettrait gratuitement son bon sens aux yeux du public scientifique; au lieu de faire ressortir comme plus rigoureux le caractère d'exactitude de ses recherches, il ne réussirait ainsi peut-être qu'à se faire suspecter.

Je pense donc bien faire maintenant, non pas en essayant de donner une théorie, mais en mettant au contraire les théories connues en face de l'expérience et en montrant lesquelles supportent cette épreuve critique.

I. *Qu'est ce que l'équivalent mécanique de la chaleur?*

Les rapports de cause à effet qui existent entre les manifestations des principes que nous appelons impondérables, et les mouvements de la matière pondérable, ont été aperçus par les physiciens dès que l'étude de ces principes a été poursuivie d'une manière qui méritât le nom de scientifique. Le calorique, l'électricité à l'état statique ou dynamique, la lumière même, ont été présentés comme *forces* dans la plupart des traités les plus élémentaires de physique; mais il faut le dire, [illegible] d'une manière implicite et sous-entendue, d'une manière souvent fort peu claire et fort mal définie.

Toutefois, entre cette idée première, plus ou moins nette d'ailleurs, d'un rapport de cause à effet, et la conception d'un rapport mathématique absolu nécessaire, il se trouve une distance immense ; il se trouve une ligne de séparation qui indique une révolution complète dans la science, qui marque la clôture d'une ère et l'ouverture d'une autre ère, au point de vue philosophique, comme au point de vue expérimental.

Il serait sans doute très-exagéré de dire que cette ligne ait été tracée par une seule main et d'un seul trait : le progrès de l'intelligence humaine ne fait point exception à la loi générale qui règne dans la nature ; et pas plus que tout autre accroissement il n'a le privilége de procéder par sauts, par degrés entièrement brisés. Dans les travaux de Laplace remontant maintenant à plus d'un demi-siècle, on trouverait déjà à la rigueur l'idée première d'un rapport défini entre le mouvement de la matière et le calorique. Les lois que ce génie analytique si profond a su déterminer, quant à la constitution des gaz, donnent une dépendance précise entre les pressions variables auxquelles on soumet successivement un gaz et la température que prend à chaque instant ce gaz en raison de ce changement de pression. Mais un changement opéré dans la pression du gaz suppose une dépense ou une production de *force motrice* comme cause déterminante, et un changement de température suppose une production ou une dépense de calorique en un lieu donné. Les lois de Laplace assignent donc de fait un rapport défini et déterminé entre le travail mécanique que coûte ou que produit la compression ou la détente d'un gaz et la dépense de calorique que produit en plus ou en moins ce travail. Ajoutons-le de suite cependant, le rapport est assigné non d'une manière directe, mais implicitement. Il l'est d'ailleurs d'une manière limitée, puisqu'il ne s'agit que des fluides aériformes.

Mais évitons ici de ressembler à beaucoup de commentateurs qui, sous prétexte de rendre justice aux hommes des temps passés, deviennent souvent fort injustes envers les modernes. Disons-le : il n'est pas d'idée première qui ait eu un développement plus rapide que celle dont je parle

Une seule citation suffirait pour le prouver : tous les traités de physique, en parlant des sources de calorique disent que le frottement est capable de développer de la chaleur (et cela est connu de mémoire d'homme) ; tous disent donc implicitement qu'une dépense de force motrice est nécessaire pour développer cette chaleur. Mais parmi les plus modernes même, il en est fort peu qui mentionnent le fait explicitement, et qui parlent d'une dépendance mathématique existant entre le travail mécanique que coûte le frottement, et la quantité de calorique qui se développe.

Deux hommes semblent avoir eu le don de résumer la question générale sous deux formes bien différentes et très-originales, et ont fondé ainsi deux théories qui semblent en antagonisme complet.

Ce sont, d'une part, Carnot (Réflexions sur la puissance motrice du feu, 1824) et, d'autre part, tout récemment, le Dr Meyer de Heilbronn (1).

Je crois bien faire de rappeler ici, sous une forme concise, ces deux théories, parce que, comme nous verrons bientôt, les faits prouvent jusqu'à l'évidence qu'elles diffèrent moins au fond qu'on n'a coutume de l'avancer; et que s'il y a un antagonisme, il existe non entre elles en réalité, mais bien plutôt entre la doctrine métaphysique que sous-entend celle de Carnot, et la doctrine métaphysique aussi que l'on s'est beaucoup trop hâté de déduire de celle du Dr Meyer.

Pour résumer la théorie de Carnot, je ne fais que réunir les diverses propositions en italiques du livre mentionné plus haut en intervertissant leur ordre légèrement et en ajoutant quelques exemples pour les dépouiller de tout caractère abstrait.

I. Partout où il existe une différence de température entre deux corps, il peut y avoir production de force motrice.

Si nous avons, par exemple, une barre de fer à 100° et une

(1) Il paraît qu'il revient à MM. Séguin et Montgolfier une large part de priorité, comme fondateurs de la théorie moderne.

autre barre semblable à 0° et que nous les mettions en contact, le calorique de la première se portera en partie dans la seconde de manière à s'équilibrer en température. Il résulte de là que la première se contracte et que la seconde se dilate; cette double action est évidemment une source de force motrice. Il est clair que cet exemple, qui semble si restreint, peut au contraire s'étendre d'une manière tout-à-fait générale. Dans une machine à vapeur, je suppose, nous dilatons l'eau en la réduisant en vapeur à l'aide d'une addition de calorique; puis nous la ramenons à son volume primitif en la mettant en contact avec un corps froid, et c'est par suite de cette alternative de dilatations et de contractions obtenues par des différences de température que se produit la force motrice.

II. Réciproquement, toutes les fois que nous dépensons de la force motrice, nous pouvons obtenir une différence de température.

Je reviendrai plus loin sur cette proposition qui est de la plus haute importance et qui de fait est contradictoire fort souvent avec la théorie même de Carnot.

III. Dans toute machine mise en mouvement par la chaleur, la production de la puissance motrice est due non à une consommation réelle de calorique, mais à son transport d'un corps chaud sur un corps froid, c'est-à-dire au rétablissement de son équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit (par une action chimique, ou toute autre).

Qu'arrive-t-il en effet dans une machine à vapeur en activité?

Le calorique développé dans le foyer va donner naissance à de la vapeur qui le transporte d'abord dans le cylindre, puis dans le condenseur, où elle se liquéfie par son contact avec de l'eau froide. Cette eau s'empare donc, en dernier résultat, du calorique développé par la combustion. Elle s'échauffe par *l'intermédiaire de la vapeur*, comme si elle eût été placée dans le foyer. La vapeur n'est ici que le véhicule du calorique.

IV. La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser. La quantité est fixée uniquemen

par les températures des corps entre lesquels se fait en dernière analyse le transport du calorique.

V. Il existe donc un maximum pour la force réalisable à l'aide d'un transport donné de calorique, à l'aide d'une *chute de température.*

Telle est en substance la théorie de Carnot : nous verrons bientôt quels sont les faits contre lesquels elle vient en partie échouer : mais quoi qu'il en soit, il serait certainement injuste de ne pas lui reconnaître un caractère de haute généralité, et en même temps de grande netteté.

L'idée d'un rapport défini entre la production de la puissance motrice, du mouvement de la matière, de la *force vive*, en un mot, et la quantité de calorique nécessaire pour tel ou tel effet, y est très-clairement énoncée.

Mais remarquons-le bien cependant, le rapport n'est formulé que pour un *transport donné*, et non à la rigueur pour une *quantité donnée* de calorique. C'est ici le point de scission le plus apparent entre la théorie de Carnot et celle du Dr Meyer.

D'après la théorie du Dr Meyer, que l'on peut énoncer d'une manière beaucoup plus brève que celle de Carnot, la production de la force motrice par le calorique ou la production d'une différence de température à l'aide d'une dépense de force motrice, ne sont pas du tout dues à un simple déplacement du calorique, mais à une consommation, ou à une production réelle de ce principe.

Entre la production ou la dépense de force motrice et la consommation ou la production de calorique, il y a un rapport constant parfaitement indépendant des corps employés comme intermédiaires. Ainsi, par exemple, une dépense donnée de force motrice, opérée en frottement, produit une unité de chaleur, et l'annihilation de cette unité dans une machine à vapeur parfaite (ou toute autre) reproduira exactement la quantité de force motrice dépensée en frottement (ou en chocs, etc. etc.). C'est ce rapport de l'unité de calorique à la

quantité de force motrice dépensée ou produite que le Dr Meyer a nommé L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Nous verrons bientôt que, mis en face de l'ensemble des faits, cet énoncé affecte une forme par trop absolue et doit être modifié en plus d'un sens ; mais nonobstant toutes ces raisons, nous pouvons le dire sans la moindre crainte d'exagération, la proposition posée par le Dr Meyer marque un des progrès les plus remarquables de la physique mécanique, et même de toutes les sciences naturelles. C'est ce que je ferai mieux ressortir dans une autre division de ce travail.

La différence essentielle qui existe entre les deux théories que je viens d'exposer, c'est que celle de Carnot attribue la production ou la consommation de force motrice à un déplacement de calorique, tandis que dans l'énoncé du Dr Meyer, la production ou la dépense de la force motrice, du travail mécanique, de la force vive, est due à un développement ou à une disparition de calorique. L'origine de cette différence est très-simple. Carnot est parti de cette opinion longtemps regardée comme fondée, c'est que le calorique est indestructible comme agent de chaleur, et que par suite, quelles que soient les modifications d'état et de forme qu'éprouve un corps, la quantité de calorique qui s'y manifeste comme chaleur doit être la même lorsque ce corps est revenu à son état primitif. Le Dr Meyer au contraire est parti d'une idée toute opposée ; c'est qu'il est une multitude de phénomènes où il se produit de la chaleur sans qu'il y ait aucun changement de forme ou d'état dans le corps, sans qu'il se fasse ou se défasse aucune combinaison chimique, etc. etc., par ce seul fait qu'il y a dépense de force motrice et anéantissement apparent de mouvement dans l'intérieur du corps où se développe cette chaleur.

Je reviendrai plus loin sur ces deux théories, pour en faire une comparaison encore plus approfondie et surtout pour apprécier leur valeur absolue.

Quoi qu'il en soit pour le moment, on voit clairement que l'idée mère d'une équivalence entre les forces se trouve déjà dans la théorie de Carnot; mais elle n'y a pas exactement le même sens, et ne peut être formulée de la même façon que dans la théorie du Dr Meyer.

Dans la première, une quantité de mouvement produite ou détruite dans la matière pondérable équivaut à une certaine dispersion ou condensation de calorique. Dans la théorie du Dr Meyer, une certaine quantité de mouvement produite ou détruite équivaut à une certaine quantité de calorique détruite ou produite comme chaleur. Ce n'est que dans cette dernière acception que le terme d'équivalent mécanique de la chaleur est réellement bien choisi.

Mais quittons pour un moment le terrain des théories, pour rentrer dans le domaine des faits purs et simples.

Etablissons ceux-ci tels quels, et sans aucune arrière-pensée de système, de théorie ou de doctrine métaphysique. Par cette raison même qu'une doctrine métaphysique prétend dominer les faits, elle ne saurait avoir de valeur qu'à la condition de sortir de l'expérience.

II. *Existe-t-il un équivalent mécanique de la chaleur ?*

Placée ainsi après l'exposition de deux théories qui supposent, chacune à sa façon, l'existence d'un équivalent, et qui sont en définitive aussi chacune l'expression d'un certain nombre de faits ; posée surtout comme conclusion d'un travail expérimental qui n'a eu d'autre but que la détermination exacte d'un tel équivalent, cette question semblera au moins étrange à beaucoup de lecteurs. Et cependant nous allons voir qu'elle est légitime : plus d'un physicien, en lisant ce travail, se la sera faite sans doute déjà plus d'une fois, et peut-être y aura même répondu négativement. J'ai à l'examiner ici au point de vue des faits d'abord, et plus tard j'aurai à l'étudier au point de vue philosophique.

Ce qui découle positivement de l'observation stricte des phénomènes et par suite de l'expérience :

1° C'est qu'il peut apparaître du calorique dans un corps, ou entre deux corps distincts, sans qu'il y ait aucun changement d'état, aucune altération quelconque *sensible* dans la nature du corps ou des corps, et sans qu'il y ait visiblement en action autre chose qu'une dépense de force motrice.

Ainsi il se produit de la chaleur par le fait du frottement de deux surfaces solides parfaitement polies et séparées par une couche d'un liquide inaltérable. Il n'y a ici ni compression, ni usure, ni aucune modification quelconque des corps que l'on puisse invoquer comme cause d'une condensation, d'une chaleur préexistante, et seulement latente, ou dispersée.

Il n'y a que consommation de force motrice, de travail mécanique, de force vive.

2° C'est qu'il peut y avoir disparition de calorique dans un corps qui, après avoir passé par différents états successifs, revient exactement à son état primitif. — Et la seule conséquence sensible de cette disparition, c'est la production d'une certaine quantité de force motrice, de travail mécanique, ou de force vive.

Ainsi dans une machine à vapeur à détente, l'eau du condenseur emporte moins de calorique que l'eau de la chaudière n'en avait reçu de la combustion et n'en avait porté dans le cylindre.

3° Enfin, c'est que la quantité de travail mécanique dépensée dans le premier cas et produite dans le second cas, est liée à la quantité absolue de calorique apparue ou disparue, de telle façon que l'une de ces quantités est évidemment une fonction de l'autre. Peu importe d'ailleurs, pour le moment, que nous regardions la force motrice produite ou dépensée comme une conséquence immédiate, ou seulement médiate, de la disparition ou de l'apparition du calorique.

En divisant le nombre d'unités de travail dépensé ou produit par le nombre d'unités de chaleur produite ou dépensée, nous arrivons à un facteur qu'en toute hypothèse on est en droit d'appeler ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Mais ce qui découle maintenant évidemment aussi des faits, c'est que ce *facteur varie*, c'est que la valeur apparente de l'équivalent, telle qu'elle est fournie par l'expérience, ne saurait positivement être considérée comme constante et absolue.

En effet, en mettant d'abord de côté mes propres recherches, et

en ne nous occupant que de celles des autres physiciens, nous trouvons de singulières divergences entre les résultats obtenus par eux. Les uns ont donné 380 kil. pour la valeur stable et définie de l'équivalent, d'autres ont porté ce nombre à 550. Ce serait certainement faire tort à l'habileté des observateurs que d'attribuer de telles différences à des erreurs expérimentales.

Si nous acceptons même seulement comme approximatifs les résultats de mes propres expériences, nous voyons encore des variations plus frappantes. L'équivalent varie ici de 60k.m. à 460k.m..

La discussion de cette variabilité est de la plus haute importance. C'est elle qui doit nous permettre de peser en quelque sorte la portée du terme d'équivalent mécanique de la chaleur. S'il en résulte qu'il est dans la nature, dans l'essence de ce rapport de varier, notre terme devient une simple convention de langage, toujours légitime, mais n'exprimant plus une relation nécessaire entre une cause et un effet. Si au contraire il en découle que le rapport n'est que troublé par des circonstances accessoires quelles qu'elles soient d'ailleurs, et qu'au dessous de toutes ces perturbations on aperçoit un facteur stable et absolu, le terme d'équivalent mécanique cessera d'être une simple convention, pour reprendre le sens que le Dr Meyer lui a assigné, pour devenir la traduction éloquente et expressive d'un fait primordial.

Or, en nous tenant toujours sur le terrain de l'expérience, il est un fait qui nous frappe. Dans les expériences où l'équivalent varie le plus, il existe au moins, si je puis dire ainsi, une *tendance* à la proportionnalité entre les quantités de travail et de calorique en jeu.

Cette tendance est tellement forte, lorsqu'il s'agit d'un même ordre de phénomènes, que j'avais cru d'abord pouvoir dire que l'équivalent est rigoureusement constant pour chaque ordre, et ce qui demeure en tous cas vrai dans cette première conclusion, c'est que dans le frottement, par exemple, les variations de la vitesse des surfaces en regard n'ont aucune influence perturbatrice sur le rapport du travail consommé au calorique développé. Il n'y a trouble

manifeste que quand la pression augmente, quand les surfaces se rapprochent.

C'est l'équivalent mécanique de la *chaleur humaine* qui visiblement s'écarte le plus des valeurs qu'affecte ce rapport, généralement parlant. Eh! bien, ici encore la tendance vers une valeur stable est manifeste: ainsi dans les expériences que j'ai faites sur moi-même, et dont je puis le plus garantir l'exactitude, l'équivalent ne varie que de 61$^{k.m.}$ à 65; il est de 62$^{k.m.}$ pour 25,000$^{k.m.}$ de travail par heure, et de 65 pour 27,500$^{k.m.}$; la proportionnalité est donc presque parfaite entre la production de la force motrice et la dépense de calorique. Une remarque fort importante, et qu'il est essentiel de ne plus perdre de vue désormais, se présente naturellement ici à l'esprit. Dans un même ordre de phénomènes l'équivalent varie, mais relativement fort peu; d'un ordre à l'autre, il varie au contraire beaucoup. Pour expliquer cette dernière variabilité par des fautes supposées dans l'expérience, il faudrait donc admettre dans les erreurs elles-mêmes une loi de proportionnalité. Or cette hypothèse, à peine tolérable pour un même genre d'expériences, devient évidemment inadmissible pour deux genres distincts d'opérations. *Ce n'est donc plus dans les erreurs expérimentales qu'il faut chercher les raisons de la non-stabilité absolue de l'équivalent*; c'est dans la nature même des phénomènes que nous devons découvrir ces raisons.

Mais cette remarque, qui d'abord ne semble concerner que le titre d'exactitude des expériences, porte au contraire en même temps et en plein sur le fond même de la question.

La constance approximative de l'équivalent dans un même ordre de phénomènes, mise en regard avec la grande variabilité de ce rapport d'un ordre à un autre, nous force aussi à dire que la cause de la variabilité, quelle qu'elle soit, se manifeste expérimentalement sous la forme d'un facteur presque constant, c'est-à-dire que les effets de cette cause de variation sont eux-mêmes presque proportionnels, soit à la force motrice dépensée ou produite, soit au calorique produit ou dépensé.

Et en définitive, nous voyons que si la variabilité des nombres donnés par l'expérience semble d'abord opposée à l'idée de l'existence d'un rapport constant, le mode de cette variation, sa forme, l'espèce de loi régulière qui domine l'irrégularité apparente, nous conduisent au contraire à admettre comme excessivement probable l'existence d'un équivalent proprement dit, dont la valeur réelle et invariable serait masquée par des circonstances accessoires, quoique inhérentes à la nature même des phénomènes. En un mot, une proportionnalité rigoureuse lie la production ou la consommation du calorique à la consommation ou à la production du travail mécanique, ou si l'on aime mieux à la destruction ou à la création du mouvement de la matière; mais cette loi mère est troublée quant à sa forme dans un même ordre de phénomènes, et quant à sa raison géométrique, d'un ordre de phénomènes à l'autre.

Il existe donc un équivalent mécanique de la chaleur. C'est ce qu'un examen plus attentif des deux théories de Carnot et du Dr Meyer va mieux faire ressortir encore, mais à un autre point de vue.

III. *Comparaison et conciliation de la théorie de Carnot avec celle du Dr Meyer.*

Les deux principes le plus en opposition, les seuls peut être en opposition réelle dans nos deux théories, sont :

1° Que, dans la théorie de Carnot, ce n'est point une consommation mais seulement un transport de calorique résultant d'une chute de température qui produit la force motrice. 2° que, dans la théorie du Dr Meyer au contraire, c'est une consommation réelle de calorique et non un simple transport, une simple dispersion qui produit la force; c'est même en ce sens seulement que l'on peut dire, comme l'ont fait beaucoup de physiciens, que la force vive n'est qu'une transformation du calorique.

Or, au point de vue des faits purs et simples d'où elles prétendent pourtant découler, ces deux propositions sont tantôt fausses, tantôt justes l'une et l'autre, mais en sens inverse, c'est-à-dire que, quand

l'une dit juste, c'est l'autre qui est en défaut. Cherchons à bien faire ressortir cette assertion, qui est capitale.

1° J'ai dit ailleurs que dans une machine à vapeur à détente le travail développé est dû à la fois à un transport et à une consommation de calorique. Je dois insister plus que je ne l'ai fait sur les données expérimentales d'où découle cette conclusion.

Rappelons-nous d'abord sommairement comment ont été conduites les recherches si précises de M. Regnault sur le calorique latent de la vapeur d'eau. Le gaz aqueux, produit sous une certaine pression dans une chaudière, était amené sans aucun changement de pression dans un calorimètre où il se condensait et cédait ainsi à l'appareil son calorique latent ; la vapeur était en un mot produite et condensée sous la même pression.

Dans de telles expériences, il est clair que la quantité de calorique amenée au calorimètre devait être exactement celle que l'eau avait reçue du foyer, ou avait exigée pour s'évaporer ; c'est ce qui s'est d'ailleurs vérifié directement par d'autres essais où le mode de mesurage a été renversé, et où le calorique fourni à l'eau se trouvait dosé directement. Et, soit dit en passant, ce qui distingue précisément la méthode expérimentale de M. Regnault, ce qui la rend irréprochable, c'est de conduire positivement à l'égalité dont nous parlons ici.

Dans ces expériences, il est clair qu'il n'y a aucun travail externe de développé : tout se passe dans l'intérieur des appareils ; et que le calorique soit transporté de la chaudière au réfrigérant comme le dit Carnot, ou qu'il soit détruit par l'évaporation et reproduit par la condensation comme le veut la théorie du Dr Meyer, cela ne peut-être décidé ici.

L'expérience cependant pourrait être conduite de façon à ce que la production et la consommation d'une force motrice se manifestassent à nous sans que l'exactitude des résultats fût en rien troublée. Amenons en effet la vapeur de la chaudière dans un cylindre tenu à la même température qu'elle et sous un piston pouvant jouer dans le cylindre ; pour fixer les idées, supposons qu'on agisse sur de la vapeur

à 1$^{at.}$ de pression et à 100° par suite; supposons que le piston ait 1^{m} carré de surface. Lorsqu'il aura passé dans le cylindre 1 kilogr. de vapeur d'eau, le piston aura été soulevé de 1$^{m.}$,698 (environ) et pour résister à la pression de la vapeur, il aura fallu que le piston oppose constamment un effort de 10333$^{kil.}$ environ. Notre kilog. de vapeur a donc produit un travail de 1,698 multiplié par 10333 où de 17514$^{k.m.}$. Maintenant séparons le cylindre de la chaudière, et mettons-le en rapport avec le calorimètre, en ayant soin de laisser constamment sur le piston sa charge première de 10333. La vapeur va se condenser, et comme rien n'a été modifié dans son état, nous trouverons rigoureusement dans le calorimètre la même quantité de calorique que celle que le foyer a livrée à la vapeur.

Notre vapeur a d'abord fourni un travail externe de 17514$^{k.m.}$, puis le piston en redescendant a restitué le même travail. Dans la théorie de Carnot, comme dans celle du Dr Meyer, il doit y avoir égalité entre le calorique envoyé par la chaudière et celui que reçoit ensuite le calorimètre. On n'est pas plus en droit de dire qu'il y a eu consommation, que de dire qu'il n'y a eu que transport.

Mais il est un procédé de condensation qui est de nature à lever ici les doutes, et c'est celui qui est précisément en usage dans les machines à vapeur. Lorsque notre vapeur de la chaudière a levé par exemple à 1$^{m.}$,698 de hauteur notre piston chargé de 10333$^{k.}$; *lorsque, par suite, elle a développé un travail de* 10333$^{kil.}$ × 1$^{m.}$,698 ou 17514$^{k.m.}$, mettons le cylindre en rapport avec une enceinte vide tenue à 0°, la vapeur à 1$^{at.}$ de pression et à 100° va s'y précipiter rapidement et s'y condenser en cédant tout son calorique latent aux parois de l'enceinte.

Dans cette expérience, il ne se produit ou ne se consomme aucun travail externe; d'après la théorie même du Dr Meyer, il ne doit ici ni se consommer, ni se produire de calorique. Si donc nous trouvons que la vapeur a cédé à notre condenseur une quantité de calorique égale à celle qu'il a fallu employer pour la produire, nous serons conduits à affirmer que nos 17,514$^{k.m.}$ de travail ont été obtenus

par le seul fait d'un transport de calorique et non pas par suite d'une consommation réelle de chaleur ([1]).

Or ceci est un fait que l'expérience permet maintenant d'affirmer. Il est à la vérité impossible de construire une machine à vapeur où le gaz aqueux n'éprouve aucune variation de pression depuis la chaudière jusqu'au bout de chaque course du piston, mais on peut au moins approcher de cette condition; et l'on observe que plus on s'en rapproche, plus aussi le nombre de calories recueilli dans le condenseur penche vers le nombre dépensé dans la chaudière et calculé à l'aide des formules de M. Regnault.

Voilà donc un fait qui confirme pleinement la théorie de Carnot.

Cependant, qu'au lieu d'expérimenter sur une machine à vapeur qui travaille pour ainsi dire sans variation de pression, nous opérions au contraire sur une *machine à détente*, et tout sera changé. Nous trouvons un déchet considérable de calorique dans l'eau de condensation, un déchet d'autant plus grand que la détente a été elle-même plus grande. La force motrice produite par la détente coûte donc réellement du calorique, tandis que la force obtenue par la pleine pression n'occasionne qu'un transport et une dispersion.

Voilà donc un fait entièrement contraire à la théorie de Carnot. Il n'est guère douteux que cette expérience répétée sur d'autres vapeurs ne conduise aux mêmes résultats.

Quoi qu'il en soit, et en dehors de toute explication, on pourrait déjà poser ce fait général : c'est que quand on produit de la force motrice en dilatant un corps par une addition de calorique, cette force est produite par le transport et la dispersion, et non par une consommation de calorique. Et que, quand au contraire on produit de la force en profitant de la puissance d'expansion naturelle au corps, il y a toujours consommation de calorique. Nous voyons même, quant à la première proposition, qu'il n'est pas du tout né-

([1]) Nous verrons ailleurs comment ce mot de transport doit être compris. Ce qui est très-clair déjà, c'est qu'il ne peut être pris dans son acception ordinaire.

cessaire que le corps conserve son état primitif après l'addition de calorique, car l'eau passe à l'état gazeux et revient ensuite à l'état liquide dans la machine à vapeur. Mais n'oublions pas combien il est dangereux de généraliser dans ce genre de questions, et combien de fois les propositions les plus solides en apparence se sont vues réfutées par les faits. Si quelque chose est propre à nous commander une telle prudence, c'est la distinction forcée qu'on est amené à établir entre les machines à vapeur primitives sans détente et les machines actuelles, sans détente aussi (page 151). Regardons comme douteux ce qui n'a pas été vérifié directement, et continuons sous cette forme réservée la comparaison de nos deux théories.

D'après la théorie de Carnot, une différence de température disponible peut toujours donner lieu à une production de force motrice, dans quelque sens que se fasse le rétablissement de l'équilibre de température; mais l'existence de cette différence de température n'est point une condition toujours indispensable par la production de la force motrice. C'est, par exemple, en vertu d'une différence que se meut le piston d'une machine à vapeur sans détente; tandis que la force motrice donnée par la détente du gaz aqueux a pour conséquence, et non pas du tout pour cause, une telle différence de température.

Nous disons que le sens dans lequel se rétablit l'équilibre de température est indifférent, au point de vue de Carnot. Une barre de fer que l'on chauffe, soulève un fardeau et donne du travail par addition de calorique; la même barre d'abord chaude que l'on refroidit soulève le même fardeau, et donne de la force motrice par soustraction de calorique. Ces deux faits ne paraissent d'abord pas conciliables à la fois avec l'autre théorie. Cependant, et c'est ici une question expérimentale sur laquelle je reviendrai, s'il fallait ajouter à la barre que l'on échauffe plus de calorique que l'on n'en soustrait à celle que l'on refroidit, pour arriver à une même somme de travail, le double fait deviendrait de nouveau conciliable aussi avec la théorie du Dr Meyer. Je suppose par exemple qu'une barre métallique, ramenée de 100° à 0°, ait soulevé de 0m,01 un poids de 100,000kil : si en faisant passer le calorique soustrait dans une autre barre iden-

tique à 0° d'abord, on ne soulève pas de 0m.,01 le même poids de 100,000kil., c'est qu'il y a eu d'une part consommation de calorique pendant le refroidissement, et puis consommation pendant l'échauffement. Mais dans cette hypothèse même qui est à vérifier, il est visible que c'est la chute, que c'est le transport du calorique qui est la cause première du travail, tandis que la consommation n'en est que la conséquence. Cette conclusion, dont la justesse semble évidente, est de la plus haute importance, comme nous verrons bientôt.

Dans la théorie de Carnot on se rend aisément compte du travail que produit une chute de température, mais la proposition inverse, qui est pourtant indispensable, est loin d'être aussi claire : on ne voit nullement, par exemple, en vertu de quoi une force motrice dépensée en frottement doit produire du calorique, puisqu'il n'y a ici ni usure essentielle, ni compression définitive des corps. Cette proposition inverse au contraire forme en quelque sorte la moitié de la base de la théorie du Dr Meyer.

Je n'ai jusqu'ici indiqué que des faits qui se concilient exclusivement avec l'une des théories. En voici maintenant qui ont un tout autre caractère.

Supposons une barre métallique tenue verticalement et solidement fixée par son extrémité inférieure. Si nous posons un poids sur l'extrémité supérieure et que la barre soit suffisamment rigide, il n'y aura aucune flexion ; il n'y aura que raccourcissement dans le sens vertical. Le poids descendra donc un peu et produira du travail ; la barre s'échauffera, et proportionnellement à la quantité de travail ; cela est conforme à la théorie du Dr Meyer et à la rigueur à celle de Carnot. Renversons l'expérience ; fixons la même barre par son extrémité supérieure, et suspendons notre poids à la partie inférieure, la barre va s'allonger et à très-peu près autant qu'elle s'était raccourcie tout-à-l'heure ; le poids descendra et produira le même travail que premièrement. Notre barre devrait donc encore s'échauffer.

Cette expérience, sans doute, ne peut être faite sous la forme que j'indique ; mais elle peut être faite aisément de mille et mille autres

manières, tout aussi concluantes. Un ressort, fait avec un corps mauvais conducteur du calorique, *se refroidit* du côté convexe et *s'échauffe* du côté concave, dans le sens duquel on le fait rapidement fléchir (¹).

En résumé, nous voyons que tantôt les faits justifient nos deux théories à la fois ; que tantôt ils justifient l'une à l'exclusion de l'autre, et que tantôt enfin ils sont en opposition avec l'une et l'autre à la fois. On ne saurait donc substituer l'une à l'autre à aucun titre. Il faut que toutes deux reçoivent certaines modifications, et puis qu'elles s'unissent ensuite de manière à s'accorder avec l'ensemble des faits.

Avant de les approfondir plus encore et au point de vue de cette conciliation, occupons-nous d'abord des doctrines philosophiques sur la nature du calorique ou des forces en général, qu'elles présupposent, ou que l'on en a tirées.

(¹) Cette assertion semble démentie par un phénomène curieux connu depuis longtemps ; en réalité elle n'est qu'une contradiction avec l'interprétation qu'on a voulu donner récemment de ce phénomène. Une bande de caoutchouc que l'on allonge vivement s'échauffe ; elle se refroidit au contraire lorsqu'elle revient à sa longueur première. On a conclu de là qu'une dépense de force motrice répond toujours à un développement de calorique, quand bien même cette force est employée à écarter les atomes des corps au lieu de les rapprocher. Une autre expérience très-facile jette du jour sur le vrai sens dans lequel il faut comprendre ce phénomène. Un gros morceau de caoutchouc, que l'on plie vivement, *se refroidit* du côté convexe et s'échauffe du côté concave. Ici il y a refroidissement, parce que les molécules s'écartent réellement les unes des autres. Si la bande de caoutchouc s'échauffe, c'est : 1° ou bien parce qu'il s'y fait des frottements internes très-énergigues par la distension ; 2° ou bien parce qu'elle diminue de volume en réalité, bien loin d'augmenter, comme on est porté de l'admettre. En s'allongeant, cette bande se rétrécit et s'amincit. Il se peut que ces deux réductions surpassent l'agrandissement en longueur.

Et remarquons-le bien maintenant, ce que nous disons ici d'une bande de caoutchouc pourrait être vrai de tout autre corps. Si donc des procédés thermométriques assez délicats permettent de réaliser un jour l'espèce d'expérience fictive prise pour exemple dans le texte, et si l'on trouve qu'une barre de fer *s'échauffe* en s'allongeant sous un effort donné, on ne sera nullement en droit de conclure quoi que ce soit contre notre argumentation.

IV. *Doctrines sur lesquelles reposent les théories de Carnot et du Dr Meyer, ou doctrines que l'on en a tirées.*

Il est facile de reconnaître la doctrine sur laquelle repose tout l'ensemble de la théorie de Carnot; elle suppose que le calorique est un principe universel, doué d'une puissance répulsive intermoléculaire dans les corps, et cherchant à se mettre partout en équilibre, mais indestructible d'ailleurs, non seulement comme force, mais comme agent thermique, comme chaleur. Les termes de transport, de chute de température, etc., qu'emploie Carnot, supposent que ce principe peut, d'un instant à l'autre et d'un lieu à l'autre, varier en quantité dans un corps: le mot quantité toutefois signifiant plutôt ici mesure d'effet que valeur absolue.

Je n'ai pas besoin de dire que Carnot n'a fait qu'accepter une doctrine généralement admise en physique à son époque; mais il est juste d'ajouter qu'il en a parfaitement entrevu déjà le fort et le faible; il suffit, pour s'en convaincre, de lire la note (page 37) de son livre.

Cette doctrine n'est plus à la hauteur de l'ensemble des faits, et les physiciens peu nombreux qui pensent, avec quelque raison peut-être, qu'elle n'a pas encore fait son temps, sont du moins obligés de reconnaître que, pour survivre, elle a besoin d'être modifiée profondément. Je ne crains point de le dire de suite cependant, elle a été dans ces derniers temps l'objet de critiques par trop exagérées. Ainsi quand on a dit qu'elle est incompatible avec l'idée même d'un équivalent mécanique de la chaleur, on avance certainement une proportion inexacte. Dans la théorie qu'il en a tirée, Carnot prouve fort bien que le mouvement perpétuel est impossible, qu'il existe un maximum de force motrice dont est capable la chaleur : il démontre ainsi implicitement l'existence d'une possibilité d'équilibre entre toutes les forces de la nature. Il montre clairement, par exemple, que jamais la force motrice, produite par un corps pesant qui tombe, ne pourra, si elle est dépensée en frottement, donner plus de chaleur que n'en consommerait une machine à feu parfaite pour reproduire la même force motrice. Il entrevoit le même fait

quant à l'électricité ; rappelons-nous cependant qu'à l'époque où son livre fut écrit, il n'était pas possible de pouvoir espérer une machine électro-dynamique.

Ni la théorie de Carnot, ni la doctrine de physique bien antérieure sur laquelle elle repose, ne sont en opposition ou en contradiction quelconque avec le principe si général et si fécond de la *conservation des forces vives.*

Mais ce qui est certain, c'est que cette doctrine renferme deux affirmations dont l'une est chaque jour plus ébranlée par les faits, et dont l'autre est décidément réfutée par eux.

En premier lieu, en effet, il devient de plus en plus probable que c'est par un mouvement vibratoire qu'a lieu la propagation du calorique d'un lieu à un autre comme chaleur. Et en tous cas, on peut regarder l'ancienne hypothèse d'un transport effectif comme insoutenable, de sorte que si le mouvement vibratoire n'était point réel, l'esprit humain serait condamné à inventer un mode nouveau de mouvement, ou plutôt à le concevoir si son existence nécessaire venait jamais à être prouvée. En second lieu, le calorique ne saurait plus être considéré comme indestructible, ni comme incréable, du moins comme puissance thermique, comme agent de chaleur. J'insiste sur cette dernière réticence, car elle est de la plus haute importance.

En face de deux des plus grandes difficultés contre lesquelles la science puisse se heurter, la physique moderne, presque en entier dans ses adeptes, penche vers une interprétation qui, fausse ou vraie, est au moins spécieuse et séduisante. Je montrerai dans une partie distincte de ce travail que cette doctrine est fort loin d'être neuve, comme on l'admet généralement, et que c'est au contraire la plus ancienne que la philosophie ait conçue sous une forme logique et complète.

Mais voyons d'abord d'où elle dérive, en quoi elle consiste, et voyons ensuite si elle est plus soutenable que son antagoniste.

I. Le calorique rayonnant, on le sait, se propage dans le vide

avec une rapidité très-grande, et probablement égale à celle de la lumière.

II. Lorsque le calorique rayonnant frappe un corps, deux cas peuvent se présenter, soit séparément et à l'exclusion l'un de l'autre, soit en même temps : 1° le corps peut se laisser traverser par le calorique sans l'arrêter, sans modifier sa vitesse ailleurs que dans ce trajet même ; 2° le corps peut l'arrêter totalement ou seulement en partie, et alors il s'échauffe et se dilate.

III. Mais puisque la propagation du calorique a lieu par un mouvement ondulatoire dans un milieu qui est partout répandu, il s'ensuit qu'un corps qui s'échauffe ou qui se refroidit, ne reçoit rien ou ne perd rien.

IV. Il ne peut donc s'échauffer, se refroidir qu'en vertu d'une action interne qui dérive de sa constitution même et qui est éveillée par le mouvement ondulatoire qui le frappe du dehors.

V. Mais *qu'est-ce qui* vibre dans l'espace que nous appelons improprement vide, de manière à donner lieu aux phénomènes du calorique rayonnant ? *Qu'est-ce qui* vibre dans les corps qui s'échauffent ? On pourrait admettre que c'est cet éther impondérable et dénué d'inertie qu'on a admis si longtemps dans la théorie des ondulations lumineuses, si les corps ne faisaient que s'échauffer et se refroidir. Mais en même temps qu'ils s'échauffent, ils se dilatent et exercent un effort plus ou moins considérable ; si l'on veut résister à cette dilatation, ils surmontent même cette résistance et produisent alors de la force motrice en dehors d'eux. Or, les mouvements d'un principe totalement dénué des qualités les plus essentielles de la matière ne pourraient se communiquer aussi à celle-ci.

VI. Donc le principe qui remplit l'espace n'est autre que la matière elle-même aussi diluée qu'on voudra d'ailleurs ; et quand un corps s'échauffe, ce n'est que la matière qui vibre elle-même. Ce sont ces ondulations plus ou moins amples qui produisent l'augmentation apparente du volume du corps.

VII. Et quand un corps, en se dilatant, nous donne de la force

[illegible]

Il y a d'autant plus de raison d'en agir ainsi, que ce n'est point en dehors de ces deux doctrines que se trouve la vérité; mais bien au contraire, très probablement, c'est dans leur union.

V. *Que signifie la variabilité de l'équivalent mécanique par rapport à ces doctrines?*

Ce qui nous frappe le plus dans la doctrine précédente, c'est sa généralité, sa précision, [illegible] phénomènes; c'est ensuite l'enchaînement [illegible] de ses parties.

Voyons à quelles suppositions nous mène cette dernière considération. Étudions d'abord le cas où l'équivalent est trop grand. Remarquons qu'il ne peut être trop grand que quand nous voulons convertir la force motrice en calorique; il ne saurait l'être quand nous voulons faire le contraire, car il résulterait de là qu'une unité de chaleur peut donner plus qu'un maximum de force motrice; ce qui est absurde en toute doctrine. Il résulte de là que, dans une suite d'expériences également exactes dans lesquelles nous transformons de la force motrice en calorique, c'est la valeur *minima* de l'équivalent trouvé qui s'approchera le plus de la vérité.

On se rappelle que le nombre moyen que j'ai trouvé dans mes essais sur les frottements médiats avec de faibles pressions, est 371 k.m., 6. Ce chiffre est donc la plus haute valeur qu'on puisse adjuger maintenant à l'équivalent; et jamais dans aucune machine à feu, on ne devra pouvoir le dépasser en produisant de la force motrice à l'aide du calorique.

Ce nombre est le plus faible : 1° de ceux que j'ai obtenus moi-même en variant les conditions de mes expériences; 2° et de ceux qu'avaient obtenus d'autres observateurs aujourd'hui assez nombreux. J'ai déjà dit que certains d'entre eux ont trouvé jusqu'à 360 k.m. pour valeur de notre rapport; et l'on se rappelle que j'ai eu jusqu'à 480 k.m. dans des essais de frottements faits avec des charges très-grandes.

Dans mes expériences notamment, il se serait donc consommé jusqu'à 480 − 371 = 109 k.m. de travail à produire des mouvements *qui se sont échappés nécessairement des appareils*, et qui diffèrent par suite totalement de ceux qui *simulent* les phénomènes du calorique. Mais quelle est la nature de ces mouvements?

Tout appareil de physique ou de mécanique est en rapport avec la terre par des supports, par des pièces qui le tiennent immobile. On pourrait admettre que les 109 k.m. de travail ont été employés à produire des vibrations sonores qui se sont dispersées à travers ces supports dans le sol. Quelques remarques très-simples nous forcent à rejeter cette explication.

Si les phénomènes que l'on a jusqu'ici attribués à un principe à part, au calorique, ne sont que les manifestations immédiates d'un certain genre de mouvements vibratoires de la matière même des corps, il est très-clair qu'aucun de ces mouvements ne pourra disparaître ni apparaître dans un corps sans qu'en dehors de ce corps ou en lui-même il n'apparaisse ou ne disparaisse un mouvement précisément équivalent. La somme de force vive que représentaient les produits partiels de chaque masse de molécules par sa vitesse élevée au carré, doit se retrouver intégralement dans le nouveau mouvement produit, s'il y a, par exemple, disparition de calorique par suite de la production d'une force motrice externe au corps où les molécules ont cessé partiellement de vibrer.

Dans cette hypothèse, il est de la dernière évidence que l'équivalent mécanique de la chaleur doit être un nombre parfaitement invariable. Et si, *par hasard*, l'expérience prouve que cet équivalent n'est point stable, on en est réduit à dire : ou que l'expérimentateur s'est trompé, ou que l'expérimentateur a mal opéré, ou qu'un mouvement quelconque s'est échappé à son insu de l'appareil qui a servi à l'expérience, ce qui au fond revient encore à une erreur d'observation. Et, si la discussion de l'expérience élimine ces deux causes d'erreurs, il est certain que la doctrine deviendra insuffisante pour interpréter les phénomènes du calorique.

Je n'ai à m'occuper ici que du second genre d'erreurs, de celles où l'observateur aurait été trompé par la nature même des phénomènes qu'il voulait étudier. En nous plaçant au point de vue de la doctrine dont nous nous occupons, il est clair pour nous que si l'équivalent mécanique de la chaleur varie, ce ne peut être que : 1° Parce que nous ne savons pas transformer tout le mouvement translatoire en vibrations calorifiques ; 2° ou, réciproquement, parce que nous ne savons pas transformer tous ces mouvements vibratoires en mouvements directs de transport. Dans le premier cas, l'équivalent sera trop grand ; dans le second, il sera trop petit ; mais dans aucun cas ; rien de ce qui échappe à la transformation ne pourra rester dans le lieu même où elle est mesurée par nous ; autrement le principe des forces vives se trouverait nié implicitement.

Voyons à quelles suppositions nous mène cette dernière considération. Étudions d'abord le cas où l'équivalent est trop grand. Remarquons qu'il ne peut être trop grand que quand nous voulons convertir la force motrice en calorique; il ne saurait l'être quand nous voulons faire le contraire, car il résulterait de là que l'unité de chaleur peut donner plus qu'un maximum de force motrice, ce qui est absurde en toute doctrine. Il résulte de là, que dans une suite d'expériences également exactes dans lesquelles nous transformons de la force motrice en calorique, c'est la valeur *minima* de l'équivalent trouvé qui s'approchera le plus de la vérité.

On se rappelle que le nombre moyen que j'ai trouvé dans mes essais sur les frottements médiats avec de faibles pressions, est $371^{k.m.}$, 6. Ce chiffre est donc la plus haute valeur qu'on puisse adjuger maintenant à l'équivalent; et jamais dans aucune machine à feu, on ne devra pouvoir le dépasser en produisant de la force motrice à l'aide du calorique.

Ce nombre est le plus faible : 1° de ceux que j'ai obtenus moi-même en variant les conditions de mes expériences; 2° et de ceux qu'avaient obtenus d'autres observateurs aujourd'hui assez nombreux. J'ai déjà dit que certains d'entre eux ont trouvé jusqu'à $560^{k.m.}$ pour valeur de notre rapport; et l'on se rappelle que j'ai eu jusqu'à $480^{k.m.}$ dans des essais de frottements faits avec des charges très-grandes.

Dans mes expériences notamment, il se serait donc consommé jusqu'à $480 - 371 = 109^{k.m.}$ de travail à produire des mouvements *qui se sont échappés nécessairement des appareils*, et qui diffèrent par suite totalement de ceux qui *simulent* les phénomènes du calorique. Mais quelle est la nature de ces mouvements?

Tout appareil de physique ou de mécanique est en rapport avec la terre par des supports, par des pièces qui le tiennent immobile. On pourrait admettre que les $109^{k.m.}$ de travail ont été employés à produire des vibrations sonores qui se sont dispersées à travers ces supports dans le sol. Quelques remarques très-simples nous forcent à rejeter cette explication.

1° Il ne faut qu'une dépense de travail mécanique relativement très-petite pour produire un son très-intense à l'oreille.

2° Dans l'expérience du forage du fer, où il se produisait un son très notable, j'ai trouvé 420$^{k.m.}$, nombre d'un peu supérieur, il est vrai, à 371, mais inférieur d'autre part aussi à 480$^{k.m.}$, valeur obtenue avec le frottement médiat à très-forte pression, où il ne se produisait aucun son et où tout l'appareil fonctionnait avec une tranquillité parfaite.

3° L'équivalent mécanique, pour le frottement médiat, est stable quelles que soient les vitesses; il augmente au contraire avec la pression.

On ne voit pas trop pourquoi des changements de vitesses ne modifieraient pas les pertes en vibrations sonores tout aussi bien que le font les variations de pressions. Mais d'ailleurs pourquoi, avec une même pression très-faible, l'équivalent s'élève-t-il de beaucoup au-dessus de 371 k.m. lorsqu'on substitue l'eau ou l'air à la graisse qui sépare les surfaces frottantes? Dans ces cas pourtant, et dans le dernier surtout, le frottement, toutes choses égales d'ailleurs, est réduit au $^1/_{100}$ de sa valeur primitive.

On n'est donc guère autorisé à invoquer les vibrations sonores même non saisissables par l'oreille, pour expliquer la dispersion de 100 k.m. de travail. Ce n'est pas non plus en vibrations électriques que ce travail s'est dispersé, car avec l'électromètre le plus sensible il n'a jamais été possible de constater le moindre mouvement électrique dans mes expériences avec la balance de frottement.

On peut, il est vrai, admettre ici d'autres vibrations; et un vaste champ est ouvert aux conjectures. On peut imaginer des mouvements qui simulent d'autres PRINCIPES IMPONDÉRABLES non encore découverts par l'expérience. De telles inventions sont permises, et de tels mouvements sont *possibles*: mais dès ce moment aussi on peut dire que la science expérimentale cessera d'être *possible*.

Ce qui vient d'être dit relativement à la transformation, *suppose*

incomplète, de la force motrice en calorique, s'applique strictement en sens inverse à la conversion, *supposée incomplète*, du calorique en force motrice.

Ici nous avons un maximum pour l'équivalent mécanique ; et ce maximum ne peut évidemment s'élever au-dessus de 371 k.m. Dans la réalité expérimentale, le plus haut chiffre obtenu avec la détente de la vapeur est de 150 k.m., et avec la chaleur humaine, de 119 k.m. Une quantité de calorique capable de produire 371—119=152 k.m. serait donc, dans le cas le plus favorable, employée à produire d'autres mouvements que ceux qui se traduiraient pour nous directement en travail.

Quelle est ici encore la nature de ces mouvements?

Arrêtons-nous sur l'examen du moteur évidemment le plus complexe, le plus délicat ; sur l'examen du moteur animé.

On pourrait dire ici, à la rigueur, qu'à l'état de repos du corps, l'oxigène appelé par l'acte respiratoire se combine d'une façon très-intime avec les éléments combustibles qu'il trouve dans l'organisme, tandis que pendant le travail, les combinaisons seraient moins intimes ou d'un autre genre.

Il résulterait de là, non qu'il *disparaît trop* de calorique, mais qu'il s'en *produit trop*, et dès lors il est clair que l'équivalent trop faible trouvé est entièrement faux. Mais il résulte des bases mêmes de la doctrine que nous étudions, que ces combinaisons prétendues moins intimes sont éliminées telles quelles, et continuellement, de l'organisme pendant toute la durée du travail, et ici l'expérience parle encore d'une manière décisive. Pendant que le corps travaille, les sécrétions sont certainement modifiées dans l'organisme, et les produits éliminés sont certainement aussi autres qu'à l'état de repos. Mais ce qui est tout aussi certain, c'est que les composés prédominants dans l'élimination sont toujours l'eau et l'acide carbonique, et à tel point que les combinaisons organiques expulsées ne sont que des accessoires presque insignifiants. Or ces deux combinaisons, en toutes doctrines, ne peuvent représenter des quantités variables de calorique. On est donc parfaitement en droit

d'admettre que l'oxigène représente à fort peu près les mêmes quantités de calorique disponibles, que le corps soit en repos, ou en mouvement.

L'hypothèse de vibrations émanant du corps et échappant à l'observation est, je pense, encore moins supportable ici que pour le cas du simple frottement.

En résumé, ce n'est donc point par des pertes externes de force vive que l'on peut expliquer la variabilité apparente mais expérimentale de l'équivalent mécanique de la chaleur. Et cependant une doctrine qui attribue aux seuls mouvements vibratoires de la matière elle-même les phénomènes du calorique, de la lumière, de l'électricité. . . . . ; ne peut expliquer qu'à l'aide de telles pertes la variabilité de l'équivalent; car, par le principe même des forces vives dont elle n'est qu'une extension, elle est condamnée à admettre l'indestructibilité des mouvements, comme la doctrine d'où est parti Carnot était obligée d'admettre l'indestructibilité des principes impondérables.

VII. *Comment peut-on légitimement interpréter les variations de l'équivalent mécanique?*

Nous avons vu qu'au-dessus de l'équivalent variable que nous donnent les divers ordres de phénomènes étudiés d'une manière exacte d'ailleurs, il existe très-probablement un équivalent parfaitement constant, qui sert de base en quelque sorte et qui n'est que troublé par des accidents *internes aux corps*, à étudier dans leur nature.

Nous avons fait déjà une remarque importante qu'il faut faire ressortir. L'existence d'un équivalent mécanique fût-il d'ailleurs totalement invariable au lieu d'être sujet à être troublé et masqué, n'est qu'une conséquence nécessaire de l'équilibre possible de toutes les forces de la nature. Cette existence, quoi qu'on en puisse dire, s'accorde tout aussi bien avec l'ancienne doctrine des physiciens qu'avec la doctrine moderne ; et l'idée d'une dépendance, d'une corrélation,

de ces forces, est plutôt neuve dans ses détails particuliers que comme proposition générale. Mais ce qui rend à la fois insuffisantes et la théorie de Carnot et la doctrine de physique sur laquelle elle s'appuie, c'est l'incapacité où se trouve celle-ci de rendre compte de l'apparition et de l'annihilation du calorique comme puissance thermique, dans mille et mille phénomènes connus aujourd'hui. Et ce qui, d'un autre côté, rend insuffisantes et la théorie du Dr Meyer et la doctrine que l'on en a tirée, c'est qu'outre un bon nombre de faits dont la première ne peut rendre compte, la variabilité de l'équivalent, comprise comme nous avons vu, est inexplicable, soit dans la théorie, soit dans la doctrine exclusive que l'on en a tirée dans ces derniers temps. Mais, dira plus d'un lecteur, quelle est la doctrine que nous devons substituer aux deux précédentes, reconnues ou incomplètes ou trop exclusives?

On pourrait répondre, à la rigueur, que de ce que deux hypothèses contraires sont reconnues fausses, on n'est pas tenu d'y en substituer à la hâte une nouvelle. Et telle serait certainement la réponse dans laquelle je me renfermerais, s'il y avait lieu d'*inventer* ou de *découvrir* quelque hypothèse nouvelle : une telle hypothèse, par ce fait même qu'elle constituerait une découverte, par ce fait même qu'elle serait réellement *neuve*, serait singulièrement sujette à caution ; car en métaphysique, on est en droit de suspecter ce qui n'a pas été *pressenti* ou *entrevu* en quelque sorte par tous les penseurs.

Mais, fort heureusement le proverbe qui dit, « la critique est aisée, l'art est difficile », se trouve ici en défaut. Il est permis, d'une part, de douter qu'aucun homme réellement consciencieux trouve jamais facile la critique, en des matières comme celles qui nous occupent. D'autre part, en thèse générale on peut dire hardiment que, dans les sciences, *l'art* doit s'exercer beaucoup plus à coordonner des faits et à en tirer directement des conséquences, qu'à *créer*; si ce précepte est quelque peu hostile à notre vanité, du moins la vérité y trouve-t-elle mieux son compte. Au cas particulier que nous voulons examiner, il s'applique dans toute sa plénitude.

Une remarque critique très-importante, sur laquelle je reviendrai au long sous une autre forme et dans une autre partie de ce tra-

C'est en ce sens que le mot composé de force vive est à la fois exact et expressif. En mécanique on appelle *force vive* le produit de la masse d'un corps par le carré de sa vitesse : sous cette forme, ce n'est qu'une définition ; mais l'esprit de cette définition, c'est que notre produit représente l'intégrale des actions successives que la force a exercées sur le corps, et qui se sont réalisées en mouvement, dans l'espace et le temps. Que ce corps ainsi *animé*, comme on dit, puisse, en rentrant en repos, donner à d'autres corps ce qu'il a reçu, il n'y a là rien qui nous étonne ; mais ce n'est assurément ici ni la vitesse, ni encore moins la masse du corps qui constituent une force. Ce mot de *force vive* ne peut donc être dédoublé sans contre-sens, quand on parle du mouvement de la matière.

Or, telle est précisément la prétention de la doctrine dont nous parlons, c'est d'*expliquer* les forces à l'aide de mouvements et de transformations de mouvements de tous genres. Que cette explication soit maintenant juste ou fausse, il est clair qu'une force, *ainsi expliquée*, n'est plus une force.

Eh ! bien, voyons cependant si cette doctrine peut aussi réellement qu'elle le veut, se passer du secours de la force proprement dite, définie comme elle l'est plus haut.

Le calorique, par exemple, dit-on, n'est point, comme on l'a pensé si longtemps, un principe spécial ; il n'est pas non plus dû aux vibrations d'un principe spécial qu'on nommerait éther ; il résulte des vibrations de la matière même. Cela est possible ; et c'est une question de faits à examiner. Mais tout mouvement vibratoire est essentiellement alternatif. Une suite de molécules *a, b, c, d, e, f, g, h,* que l'on suppose vibrer dans une même direction, occupent alternativement les deux positions ?

ab — cd — ef — gh

b c — d e — f g — h

Il y a ainsi pour chacune d'elles, paire à paire, deux instants où leurs vitesses sont *nulles* : il faut donc qu'en elles, sinon autour d'elles, se trouve une *activité* capable de tirer la matière du repos

et de l'y faire rentrer, sans la préexistence d'aucun mouvement quelconque. Cette puissance, si l'on veut, s'appellera l'élasticité; mais l'élasticité ainsi conçue n'est visiblement qu'un cas particulier de la FORCE.

Notre doctrine, après s'être efforcée de nier l'existence des forces proprement dites, est obligée de la reconnaître dans l'atome lui-même ou de se réfuter; c'est éloigner une difficulté, et non certes pour la résoudre, mais pour l'agrandir.

Puisque cette doctrine, qui, par son essence même, tend à éluder la conception de force, est obligée, en dernière analyse, d'aboutir à cette *prétendue* hypothèse, nous pouvons affirmer hardiment que ce n'est point dans un mouvement antérieur qu'est la cause réelle des mouvements en général de la matière, mais qu'elle réside au contraire dans une activité spécifique indépendante de toute idée de mouvement. L'existence de la force ou des forces (nous verrons ailleurs ce qu'il faut dire du nombre), cette existence est un fait et non une hypothèse. C'est ce qui ressortira, sous de toutes autres formes, dans la dernière partie de ce travail. Restons donc sur le terrain des faits, et essayons de bien caractériser ce qui distingue les divers mouvements et les forces.

I. En dehors de toute hypothèse, les FORCES peuvent se diviser en deux classes principales :

1° Les unes ne manifestent leurs effets que quand les parties matérielles qu'elles mettent en rapport d'attraction ou de répulsion sont extrêmement rapprochées et ne sont plus pour nous séparées par un espace sensible. Ces forces ont été avec raison nommées moléculaires : car elles ne s'adressent qu'aux parties constituantes des corps, et non à l'ensemble des corps. Telles sont l'affinité chimique, la cohésion, le calorique.

2° Les autres au contraire agissent à des distances sensibles; telles sont la gravitation universelle, les attractions et répulsions magnétiques ou électriques; elles s'adressent aussi bien à l'ensemble des corps qu'à leurs molécules, et il n'est pas possible de fixer une

distance à laquelle l'action s'arrête ; il est même possible que cette distance soit infinie.

Ces deux classes pourraient se diviser en deux genres très-distincts :

1° Les FORCES sont : 1° ou *invariables*, *immuables*, et constituent pour ainsi dire (du moins dans le langage ordinaire) des *propriétés* de la matière : telle est la gravitation universelle, par exemple ; 2° ou *variables*, *mobiles*, et peuvent d'un instant à l'autre s'éveiller ou s'éteindre : telles sont les actions attractives ou répulsives de toutes espèces, que déterminent le calorique, l'électricité, la lumière même (quoique indirectement).

II. En tant qu'on le considère comme un simple fait, et non dans son essence même, qui nous est inconnue, tout mouvement est soumis aux conditions finies du temps et de l'espace, c'est-à-dire qu'il peut être mesuré en étendue et en durée. Ainsi le transport d'un corps d'un lieu en un autre, si rapprochés que soient ces deux lieux, ne peut se faire en un temps infiniment petit ; ainsi la propagation ondulatoire du son est mesurable et est même relativement très-lente ; ainsi la vitesse de la propagation du calorique rayonnant, de la lumière, de l'électricité, quoique beaucoup plus rapide, est encore assignable.

III. L'action des forces, au contraire, *paraît* échapper entièrement aux conditions finies du temps et de l'espace. Ainsi, d'une part, il n'est pas possible de fixer une distance où *cesse* l'attraction réciproque de deux masses matérielles, où *cesse* l'attraction ou la répulsion de deux corps électrisés. D'un autre côté, Laplace a démontré que, si l'action de la pesanteur est sujette réellement à une propagation, celle-ci est du moins de plusieurs cent mille fois supérieure à la vitesse de la lumière. — Nous disons : « l'action des forces *paraît* échapper ..... ». L'infini, en effet, ne peut se démontrer expérimentalement. L'analyse appuyée sur l'observation ne pouvait ici que prouver l'existence d'une *limite inférieure* que la vitesse supposée de la gravitation ne peut franchir ; l'analyse seule peut ensuite nous permettre d'affirmer que cette vitesse n'a pas de *limite supérieure*, qu'elle est infinie.

IV. De ces deux faits on déduit une troisième de la plus haute importance. Deux corps distincts et séparés par un intervalle quelconque, s'attirent toujours comme masses matérielles ; mais pour constater cette action entre ceux dont nous disposons à la surface de la terre, il nous faut des moyens d'une délicatesse extrême ; ils peuvent être cependant mis de plusieurs manières dans des conditions telles qu'ils s'attirent ou se repoussent d'une manière très-intense. La polarisation magnétique (s'ils sont aimantables), l'électrisation, ou des courants électriques qui les traversent parallèlement (s'ils sont conducteurs), les mettent par exemple dans ces conditions.

Pour amener la polarité magnétique, pour amener les états électrostatiques ou électro-dynamiques, il faut un temps sensible quoique très-petit ; pour que les deux corps, supposés libres et mis ainsi dans un état nouveau d'attraction ou de répulsion, prennent une vitesse sensible, il faut aussi et surtout un temps sensible. Tout au contraire, il ne peut s'écouler qu'un temps infiniment petit entre le moment où ils se trouvent capables de s'attirer ou de se repousser et le moment où ils s'attirent ou se repoussent effectivement.

Ce que nous disons ici des forces qui agissent à des distances sensibles, reste tout aussi clair pour les forces moléculaires ; il faut, par exemple, un certain temps à un courant électrique pour traverser un liquide qu'il va décomposer chimiquement. Il faut aussi, et surtout un certain temps, pour que la décomposition amène aux électrodes une quantité sensible des composants. Il est clair au contraire que l'activité qui va séparer les molécules commence instantanément avec le courant lui-même.

Nous sommes amenés ainsi à séparer d'une manière bien plus nette encore les forces et les mouvemens ; nous sommes amenés aussi d'autre part à classer les mouvemens.

V. Deux conducteurs parallèles séparés par un intervalle quelconque, vide ou plein de matière conductrice, et parcourus par deux courants électriques, s'attirent ou se repoussent selon le sens relatif des courants.

L'attraction et la répulsion ne s'expliquent pas plus ici par le fait direct du mouvement des courants, que l'élasticité par exemple ne peut s'expliquer par un mouvement antérieur; elles sont le résultat d'une force proprement dite qui est évidemment en connexion avec le mouvement et qui n'est qu'éveillée par lui. Mais, tandis que le courant est limité dans le temps et l'espace, la force qu'il éveille s'étend à l'infini, et avec une vitesse infinie en dehors de lui en tant que puissance capable de tirer la matière du repos ou de l'y faire rentrer.

S'il y a connexion évidente entre un mouvement et la force, dans le cas particulier qui vient d'être cité, si la force s'éteint quand le courant s'arrête, cette liaison comme durée n'est pas du tout un fait général. Lorsque nous électrisons un corps, il reste dans cet état tant que nous le tenons isolé, et pendant tout ce temps il attire ou repousse, il tend à tirer du repos d'autres corps qui l'entourent.

Il y a mouvement pendant que le corps s'électrise, mais aucun mouvement n'explique jusqu'ici la durée de l'état, et n'expliquera jamais les attractions et répulsions qu'il éveille.

On peut citer une preuve plus frappante encore de la vérité de ce qui précède. On sait qu'un conducteur roulé en hélice et traversé par un courant électrique se comporte comme un aimant, et qu'un barreau d'acier placé dans cette hélice s'y aimante d'une manière permanente. Ce fait prouve l'identité de la force magnétique avec la force qui se manifeste autour d'un courant électrique. Un aimant peut être figuré exactement en résultat par l'hypothèse d'un ensemble de courants électriques circulant dans des plans parallèles autour des atomes de l'acier. Que cette figure, que nous devons au génie d'Ampère, soit l'expression réelle de la vérité, ou qu'elle ne soit qu'une image éloquente indiquant l'origine d'un aimant, cela est peu important ici. La puissance magnétique dure quand le mouvement électrique externe qui l'a éveillée s'est arrêté. Voilà tout ce qu'il est essentiel de constater (¹).

(¹) Les courants électriques circulaires, s'ils existent de fait, ne peuvent en tous cas pas être assimilés complètement au courant primitif qui provoque la formation

Si, des forces qui se manifestent à des distances sensibles, nous passons aux forces moléculaires, nous arrivons encore exactement aux mêmes conséquences.

L'électricité par exemple, sous forme de courants, est capable de rompre les combinaisons chimiques les plus énergiques, ou de combiner les éléments qui ont le moins d'affinité l'un pour l'autre; on la regarde, et probablement avec raison, comme le principe même de l'affinité. — A la première vue, on peut être porté à attribuer au mouvement électrique même la rupture ou la production de l'équilibre chimique; il est évident au fond cependant que, puisque l'état de séparation ou de combinaison dure, la cause qui le fait durer ne peut être d'une autre nature que celle qui l'a déterminé.

On est ainsi amené, par l'étude impartiale de faits purs et simples, à cette conséquence qui d'ailleurs va se vérifier de plus en plus: lorsque les principes que l'on a jusqu'ici, à tort ou à raison, nommés impondérables, tirent la matière du repos ou l'y font rentrer, le phénomène est dû à ce que d'une manière ou d'une autre, ces principes éveillent entre les parties matérielles l'activité d'une puissance attractive ou répulsive, et non pas du tout à un simple échange immédiat de mouvement.

Cette conséquence n'est au fond, si l'on y regarde bien, que l'énoncé même de faits que nous pouvons observer sans cesse sous mille et mille formes dans la nature. Elle demeure vraie en toute hypothèse que l'on voudra faire sur ces principes; elle demeure vraie, quand bien même on ne les considérerait que comme des mouvements de la matière; cependant elle prend ici évidemment une forme paradoxale qui, n'y eût-il aucune autre raison pour cela, devrait nous porter à rejeter cette interprétation.

de l'aimant. Lorsqu'on place un circuit fermé près d'un autre traversé par un courant électrique, il ne se produit de courant d'induction qu'au moment où l'électricité commence à circuler ou cesse de circuler dans le second. L'aimant au contraire *dure*, non seulement tant qu'il est dans l'hélice, mais quand il en est retiré. Ampère a parfaitement aperçu cette difficulté, et l'a résolue en disant que des *courants circulent toujours autour des atomes des corps capables de s'aimanter, et que l'aimantation ne fait que rendre ces courants permanents parallèles.*

1° Il ne faut qu'une dépense de travail mécanique relativement très-petite pour produire un son très-intense à l'oreille.

2° Dans l'expérience du forage du fer, où il se produisait un son très-notable, j'ai trouvé 420 k.m., nombre d'un peu supérieur, il est vrai, à 371, mais inférieur d'autre part aussi à 480 k.m., valeur obtenue avec le frottement médiat à très-forte pression, où il ne se produisait aucun son et où tout l'appareil fonctionnait avec une tranquillité parfaite.

3° L'équivalent mécanique pour le frottement médiat est stable quelles que soient les vitesses; il augmente au contraire avec la pression.

On ne voit pas trop pourquoi des changements de vitesses ne modifieraient pas les pertes en vibrations sonores tout aussi bien que le font les variations de pressions. Mais d'ailleurs pourquoi, avec une même pression très-faible, l'équivalent s'élève-t-il de beaucoup au-dessus de 371 k.m. lorsqu'on substitue l'eau ou l'air à la graisse qui sépare les surfaces frottantes? Dans ces cas pourtant, et dans le dernier surtout, le frottement, toutes choses égales d'ailleurs, est réduit au 1/100 de sa valeur primitive.

On n'est donc guère autorisé à invoquer les vibrations sonores même insaisissables par l'oreille, pour expliquer la dispersion de 109 k.m. de travail. Ce n'est pas non plus en vibrations électriques que ce travail s'est dispersé, car avec l'électromètre le plus sensible, il n'a jamais été possible de constater le moindre mouvement électrique dans mes expériences avec la balance de frottement.

On peut, il est vrai, admettre ici d'autres vibrations; et un vaste champ est ouvert aux conjectures. On peut imaginer des mouvements qui simulent d'autres PRINCIPES IMPONDÉRABLES non encore découverts par l'expérience. De telles inventions sont permises, et de tels mouvements sont *possibles*: mais dès ce moment aussi on peut dire que la science expérimentale cessera d'être *possible*.

Ce qui vient d'être dit relativement à la transformation, supposée

incomplète, de la force motrice en calorique, s'applique strictement en sens inverse à la conversion, *supposée incomplète*, du calorique en force motrice.

Ici nous avons un maximum pour l'équivalent mécanique; et ce maximum ne peut évidemment s'élever au-dessus de 371 k.m. Dans la réalité expérimentale, le plus haut chiffre obtenu avec la détente de la vapeur est de 150 k.m., et avec la chaleur humaine, de 119 k.m. Une quantité de calorique capable de produire 371 — 119 = 152 k.m. serait donc, dans le cas le plus favorable, employée à produire d'autres mouvements que ceux qui se traduisent pour nous directement en travail.

Quelle est ici encore la nature de ces mouvements?

Arrêtons-nous sur l'examen du moteur évidemment le plus complexe, le plus délicat; sur l'examen du moteur animé.

On pourrait dire ici, à la rigueur, qu'à l'état de repos du corps, l'oxygène appelé par l'acte respiratoire se combine d'une façon très-intime avec les éléments combustibles qu'il trouve dans l'organisme, tandis que pendant le travail, les combinaisons seraient moins intimes ou d'un autre genre.

Il résulterait de là, non qu'il *disparaît trop* de calorique, mais qu'il s'en *produit moins*, et dès lors il est clair que l'équivalent trop faible trouvé est entièrement faux. Mais il résulte des bases mêmes de la doctrine que nous étudions, que ces combinaisons prétendues moins intimes sont éliminées telles quelles, et continuellement, de l'organisme pendant toute la durée du travail, et ici l'expérience parle encore d'une manière décisive. Pendant que le corps travaille, les sécrétions sont certainement modifiées dans l'organisme, et les produits éliminés sont certainement aussi autres qu'à l'état de repos. Mais ce qui est tout aussi certain, c'est que les composés prédominants dans l'élimination sont toujours l'eau et l'acide carbonique, et à tel point que les combinaisons organiques expulsées ne sont que des accessoires presque insignifiants. Or ces deux combinaisons, en toutes doctrines, ne peuvent représenter des quantités variables de calorique. On est donc parfaitement en droit

célestes, comme le prouvent les manifestations de lumière et de chaleur, mais encore dans l'intérieur des corps, dont il fait alors partie constituante, et où il se trouve en quelque sorte localisé d'une manière particulière à chaque corps, comme le prouve tout l'ensemble des manifestations impondérables. Il importe peu, pour le moment, de savoir si le calorique, la lumière, etc., sont des mouvements différents dont est capable un seul principe universel, ou si ce sont des mouvements semblables qui s'opèrent dans des principes analogues de nature et partout coexistants, mais spécifiquement distincts. Ce qui demeure très-clair en l'une et l'autre de ces suppositions, c'est que ce principe, considéré collectivement, est capable de deux manifestations très-nettes : force et mouvement. A chaque mode de mouvement répond un mode de force spécifique. Ainsi, le calorique rayonnant se propage à travers les espaces sans occasionner aucune action dynamique sur les corps qui s'y trouvent ; il peut même traverser les corps diathermanes sans y déranger aucunement l'état d'équilibre des molécules. Vient-il au contraire à prendre dans les corps une forme diffuse, à y être assimilé, aussitôt il devient collatéral à une force répulsive exclusivement intermoléculaire. Ainsi, l'électricité au contraire, lorsqu'elle se propage sous forme de courants à travers un liquide qu'elle décompose, ou à travers un conducteur sur lequel elle n'a point d'action directe, agit encore extérieurement sur d'autres courants, comme force attractive ou répulsive.

VII. Le calorique, l'électricité, la lumière même, peuvent désormais être considérés dans l'ensemble de leur manifestation double ; car il est de plus en plus évident que ce n'est point le mouvement propre à leur propagation qui se communique à la matière et la tire du repos, mais que ce mouvement ne fait qu'éveiller, dans le principe où il s'accomplit, l'activité qui le manifeste comme force attractive ou répulsive.

VIII. Mais ce qui est tout aussi évident, pour peu qu'on se tienne toujours dans l'ordre expérimental, c'est que les mouvements du principe impondérable, par les forces qu'ils éveillent ou plutôt qu'ils manifestent, [illegible] les mouvements que les forces déterminent ensuite dans la matière, [illegible] connexion intime, qui peut s'exprimer mathématiquement, [illegible]

nous conduit aux considérations les plus importantes [illegible] physique mécanique.

Toutes les fois que nous voyons naitre une attraction ou une répulsion entre deux parties matérielles, toutes les fois que nous voyons varier l'attraction ou la répulsion qui pouvait exister déjà entre elles, nous pouvons être certains qu'il s'est manifesté quelque part un mouvement dans un principe impondérable. Mais il nous est impossible de décider si la durée de ce mouvement est nécessaire pour la durée de la force éveillée. Ainsi, par exemple, lorsque la pression d'un gaz homogène, renfermé dans un espace invariable, vient à augmenter, nous sommes sûrs qu'il y a eu un mouvement de calorique. Lorsqu'un barreau d'acier acquiert la polarité magnétique, nous sommes sûrs qu'il s'est développé en lui des courants électriques perpendiculaires à la direction de la résultante magnétique. Mais les mouvements calorifiques et électriques continuent-ils quand la pression du gaz est devenue stable, quand l'état magnétique ne varie plus? L'affirmation, *généralement admise*, est plutôt ici une hypothèse élégante et commode, propre à peindre la source d'un phénomène, qu'une vérité démontrée.

Il est un grand nombre de cas cependant où la durée de la force est visiblement liée avec la continuation du mouvement de l'impondérable qui éveille cette force. Ainsi l'action réciproque à distance de deux courants électriques ne dure qu'autant que durent ces courants. Ainsi la contraction d'un muscle, qui nous permet de tenir un poids soulevé et immobile à l'aide d'un de nos membres, ne dure que tant que la volonté détermine vers ce muscle l'affluence de l'impondérable qui en produit la contraction. Ces cas très-nombreux nous autorisent donc à accepter sans aucun contre-sens l'hypothèse ci-dessus.

Quoi qu'il en soit, dès que la force éveillée est devenue stable, au lieu de rendre seulement [illegible] rompre l'équilibre de deux parties matérielles, [illegible] cet équilibre, [illegible] dès que toute autre force [illegible] se manifeste, il disparaît dans l'impondérable une quantité de mouvement qui est équivalente à *la quantité d'équilibre rompue* (il importe d'appuyer sur cette ex-

pression en raison de son étrangeté; en réalité, c'est la plus précise qui puisse s'employer ici).

Cette proposition générale n'est au fond que l'énoncé serré et concis des faits; dégagée de son caractère abstrait de formule, et convenablement éclaircie par quelques applications, elle nous permet de rendre compte des moindres circonstances qui concernent l'équivalent mécanique considéré, soit comme conception métaphysique, soit comme expression d'un fait physique.

IX. Concevons un électro-aimant agissant sur une masse de fer doux, éloigné de lui et parfaitement libre de se mouvoir. Cette masse s'approchera des pôles de l'aimant avec une vitesse de plus en plus grande. Pendant toute la durée de ce mouvement, le courant électrique qui détermine la formation de l'aimant éprouvera un déchet dont la somme sera à chaque instant proportionnelle (à peu près) à la force vive acquise par la masse tirée du repos.

Un gaz renfermé dans un récipient quelconque exerce sans cesse une pression sur tous les points des parois de ce récipient. Supposons qu'à un tel récipient soit adapté un cylindre dans lequel un piston puisse se mouvoir sans frottement, et sans aucune autre résistance d'ailleurs; le gaz va pousser le piston avec une vitesse de plus en plus grande, et en même temps la température baissera. Pour le tenir à la même température pendant la détente, il faudra lui fournir une quantité de mouvement calorique à chaque instant proportionnelle à la force vive acquise par le piston.

Ces deux exemples nous montrent une dépendance numérique entre le mouvement de la matière pondérable et les mouvements des principes impondérables qui ont éveillé les forces donnant lieu aux mouvements de la matière; mais ils ne nous montrent que d'une manière détournée les rapports des diverses forces entre elles.

X. Lorsqu'un corps se meut uniformément, on peut supposer qu'il n'est soumis à l'action d'aucune force, ou qu'il est soumis à celle de deux forces égales et contraires. En mécanique rationnelle, il est absolument indifférent d'admettre l'une ou l'autre de ces suppositions, et l'on n'a besoin de s'occuper des forces qu'en tant

que l'une d'elles varie en intensité ou en direction. Physiquement parlant, il n'est pas du tout indifférent de procéder ainsi.

Supposons que notre masse de fer attirée par l'électo-aimant, au lieu d'être libre de se mouvoir, éprouve sans cesse une résistance par suite de l'action d'une autre force, et supposons que cette résistance soit sans cesse aussi rigoureusement égale à l'action de l'aimant : si la masse de fer était primitivement en repos, elle y restera ; si, au contraire, elle a reçu une impulsion dans la direction de l'une ou de l'autre de nos deux forces, elle se mouvera uniformément. En mathématique, nous pouvons ici faire abstraction de nos forces, dont la somme est égale à zéro ; en physique nous ne le pouvons pas. Si la masse de fer s'approche des pôles de l'aimant, le mouvement électrique éprouvera un déchet comme ci-dessus ; si elle s'éloigne des pôles, le mouvement électrique éprouvera un accroissement.

Supposons que notre piston aussi, au lieu d'être libre de se mouvoir et de *fuir devant le gaz*, soit au contraire poussé par une pression constamment égale à celle du gaz ; il restera immobile, s'il l'était primitivement ; il se mouvera uniformément en avant ou en arrière, s'il a reçu une impulsion à un instant quelconque. Mathématiquement nous pouvons encore faire abstraction des deux forces contraires, physiquement nous ne le pouvons point. Si le piston s'éloigne du récipient, le gaz se refroidira, il y aura déchet de calorique ; s'il s'approche du récipient, le gaz s'échauffera, il y aura production de calorique.

Dans chacun de ces cas, le déchet ou l'accroissement du mouvement impondérable est à peu près proportionnel à chaque instant au produit de chaque espace infiniment petit parcouru par l'intensité de la force qui répond à cet espace infiniment petit. Et la somme des déchets ou des accroissements des mouvements impondérables est proportionnelle, à peu près, à la *somme* de tous ces produits partiels, *au travail mécanique*.

Présentées sous cette forme, nos deux expériences ont une portée singulièrement plus élevée qu'en premier lieu.

XI. Nous voyons tout d'abord qu'il existe une *possibilité d'équilibre*, une corrélation (pour nous servir du terme si employé de nos jours) entre toutes les forces de la nature. Nous n'avons pas eu à spécifier, en effet, l'espèce de forces faisant antagonisme à la force électrique dans un cas, à la force calorique dans l'autre cas: cette force sera la gravitation, l'adhésion moléculaire, le calorique, l'électricité, peu importe; il n'y aura rien de changé au résultat final.

XII. Nous voyons que la distinction que nous avons faite dès l'abord, en divisant les FORCES en *forces variables* et en *forces immuables*, n'est pas une simple convention utile de langage, mais qu'elle porte sur la réalité des faits (peu nous importe toujours qu'il n'existe qu'un principe capable de se manifester de différentes façons, ou qu'il en existe plusieurs). Lorsqu'à l'aide d'une *machine à feu* quelconque, nous élevons uniformément un fardeau, la FORCE CALORIQUE est employée à revivifier à chaque instant le mouvement qu'à chaque instant aussi annule la FORCE GRAVITATION. Celle-ci est inépuisable dans son activité; l'autre au contraire s'épuise, et il faut un mouvement spécial pour la réveiller dans l'impondérable. C'est ce mouvement qui, collatéralement, forme les phénomènes proprement dits du calorique ou de la chaleur. Il doit y avoir et il y a, en effet, équivalence entre le mouvement calorifique ici nécessaire et la quantité d'action dépensée à élever le fardeau.

XIII. Nous disons que le mouvement de l'impondérable est nécessaire pour éveiller la force qui est une de ses manières d'être. Cette expression est peu convenable peut-être en ce sens qu'elle entraine pour nous l'idée de cause à effet entre le mouvement et la force; pour la conserver, il importe, en tous cas, de dépouiller le verbe de son activité et de se rappeler qu'il n'indique qu'une coexistence nécessaire. On tomberait dans une grande méprise, en effet, si on prenait ici la force pour le résultat d'un mouvement. La force et le mouvement sont seulement en connexion, en parallèle, de telle sorte qu'en général du moins, l'un ne peut pas se manifester sans l'autre dans les corps, et il n'est pas possible de regarder l'un quelconque des deux comme déterminé par l'autre. Cette connexion est telle que toute idée de transformation devient absurde. Un exemple

expérimental éclaircira ce qui précède, mieux que tout autre développement.

Entourons l'armature en fer doux d'un aimant d'une hélice formée d'un conducteur isolé; fermons ce circuit de manière à pouvoir constater ce qui s'y passe. Si nous tenons les deux pôles de l'aimant immobiles à quelque distance de l'armature, rien ne se manifestera; dès que nous commençons à avancer les pôles, il se produira un courant électrique; dès que nous les reculerons, il s'en produira encore un, mais en sens inverse. Dans ce dernier cas, nous consommons un certain effort à retenir l'aimant attiré vers son armature; nous consommons de la force, et il n'y a pas lieu de s'étonner en apparence qu'un mouvement impondérable soit le résultat de cette dépense. Dans le premier cas c'est l'inverse qui a lieu; si l'aimant était libre, il se précipiterait vers son armature avec une vitesse de plus en plus grande; il acquerrait une certaine force vive, et pourtant dans ce cas encore, le mouvement électrique se manifeste : il ne peut donc être à aucun titre considéré comme une cause.

XIV. De toutes les considérations expérimentales qui précèdent il découle aussi, et de plus en plus évidemment, que nous ne pouvons point regarder les forces comme des espèces d'abstractions échappant à la réalité de l'existence.

En dynamique, et lorsque nous ne nous occupons que de l'équilibre, ou des mouvements successivement variables par lesquels passe un corps, nous pouvons toujours ramener à une résultante unique, en intensité et en direction, toutes les forces qui agissent sur le mobile. Si cette résultante est égale à zéro en intensité, le mobile reste en repos, ou se meut *uniformément*, quand il était déjà en mouvement. Réciproquement, toutes les fois que nous voyons un corps en repos, ou à l'état de mouvement *uniforme*, nous pouvons admettre, ou qu'il n'est soumis à l'action d'aucune force, ou que toutes les forces qui agissent sur lui se font équilibre. La force, en un mot, n'est ici considérée que comme une grandeur mathématique et que dans la grandeur de ses effets.

En physique mécanique, où nous nous occupons des agents naturels en général dans la réalité de leur existence, où les forces (du

moins certaines forces) nous apparaissent comme capables de fournir seulement une mesure donnée d'effet, nous ne pouvons plus du tout procéder ainsi. En ce sens : 1° deux forces égales et contraires ne peuvent être regardées pour cela comme nulles ; 2° lorsqu'un corps se meut uniformément nous ne pouvons, à aucun titre, faire abstraction des forces égales, en intensité, qui agissent sur lui ; 3° le mouvement d'une masse matérielle, *la force vive* qui l'anime, n'a plus qu'une signification relative ou même accessoire ; 4° la fonction la plus essentielle des forces, ce n'est plus d'imprimer des vitesses variables à des masses de matières données, ou de tenir les corps en équilibre, mais elle consiste bien plutôt à *coordonner* d'une manière ou d'une autre les positions respectives des corps où des parties matérielles qui forment ces corps. L'un des exemples que nous avons déjà cités est éminemment propre à dégager cet ensemble d'assertions de leur caractère abstrait, et de nous ramener ensuite d'une manière très-concise à ce qui concerne la question de l'équivalent mécanique de la chaleur, de l'électricité, etc. ; mais il est nécessaire de développer davantage cet exemple.

XV. Concevons un réservoir de 1000 mètres cubes d'air à 1$^{\text{at.}}$ de pression ; à ce réservoir adaptons un cylindre vertical de 1 mètre carré de section, dans lequel se meut *sans frottement* un piston d'un poids de 10333$^{\text{kil.}}$; au-dessus de ce piston faisons un vide parfait de telle sorte qu'aucune autre cause que la pesanteur ne tende à le faire descendre.

Dans ces conditions, le piston, étant par son poids en équilibre parfait avec la pression de l'air du réservoir, restera immobile. Enlevons maintenant gramme par gramme de son poids, à chaque poids enlevé il s'élèvera jusqu'à ce que l'air ait, par sa détente, perdu assez de pression pour faire de nouveau équilibre au poids actuel du piston. L'air du réservoir baissera de température par suite de sa détente ; mais ajoutons de la chaleur de telle sorte que la température reste constante et que l'expansion se fasse selon la loi de Mariotte. Lorsque nous avons enlevé au piston de 10$^{\text{k.}}$,333 et qu'ainsi la charge aura été diminuée de $^1/_{1000}$, l'air se sera dilaté de 0,001 aussi, et aura élevé de 1$^{\text{m.}}$ un poids qui était d'abord de 10333$^{\text{k.}}$ et qui est devenu 10322$^{\text{k.}}$,667. Un calcul facile nous apprend que le poids moyen élevé de 1$^{\text{m.}}$ est de 10328$^{\text{k.}}$

La dilatation du gaz a donc produit un travail mécanique de 10328$^{k.m.}$; pour obtenir ce travail, nous avons dépensé environ $\frac{10328}{425}$ k. = 24$^{cal.}$,3 (nous pouvons ici prendre sans inconvénient 425 pour l'équivalent généralement admis quant au gaz).

Nous pourrions exprimer le travail sous une autre forme : si le cylindre était horizontal, la pression du gaz n'étant plus équilibrée par le poids du piston, serait employée à pousser celui-ci en avant avec une vitesse de plus en plus grande. Au bout de 1$^{m.}$ de course dans de telles conditions, cette vitesse serait telle, que son carré, divisé par 2 et multiplié par la masse du piston, donnerait encore pour produit final 10328$^{k.m.}$ (environ). On sait, en effet, que la moitié de la force vive que possède un mobile, représente le produit de l'intensité moyenne d'une force qui agit sur ce mobile par un chemin donné (¹).

Cette manière de représenter la force produite est plus détournée que la précédente, et tend d'ailleurs, comme on va voir, à nous donner une notion fausse des faits. 1° Elle suppose un mobile entièrement libre ; or, en réalité nous ne pouvons savoir, la plupart du temps, si un corps est dans cet état ; 2° elle entraîne l'idée d'une vitesse de grandeur variable et croissante ; or, nous pouvons procéder de manière à ce que notre piston se déplace à peu près uniformément et ne possède qu'une vitesse insignifiante pour s'élever ; 3° elle suppose l'existence d'une masse ; or, nous pouvons faire abstraction complète de la masse de notre piston en remplaçant *son poids* par toute autre pression égale. C'est ce qui va devenir palpable.

Au lieu de tenir notre cylindre verticalement, couchons-le horizontalement ; au lieu de le supposer fermé et vide au-dessus du piston, ouvrons-le ; au lieu de supposer un piston de 10333$^{k.}$, réduisons-le à un diaphragme hermétique mobile, mais sans poids sensible. Ce piston restera encore immobile comme d'abord, car il

(¹) Il serait plus correct de dire : [illegible] l'intégrale des produits des chemins élémentaires par l'intensité de la force répondant à ces éléments.

est maintenant poussé par la pression atmosphérique qui est aussi de 10333k., par mètre carré.

Dans ce nouvel état de choses, nous pouvons ignorer totalement la valeur des deux forces égales et contraires qui agissent sur le diaphragme. Ce diaphragme est *immobile*, mais la plus légère pression que nous exerçons sur lui le déplace sensiblement (puisque nous supposons le frottement nul); nous pouvons donc le *croire libre*.

Exerçons maintenant sur lui une traction croissante qui le force à marcher vers son extrémité ouverte. L'air du réservoir va se détendre et se refroidir; tenons-le cependant à une même température, en ayant soin de mesurer la quantité de chaleur qu'il faut lui fournir pour cela.

Un calcul aisé nous montre que quand nous aurons retiré notre piston de 1m., le produit du chemin par la moyenne de tous les efforts successifs exercés sera de 6k.m. (environ); ce sera le travail que nous aurons dépensé pour mouvoir le diaphragme. C'est tout ce que nous connaîtrons de la force unique et croissante, qui nous paraît agir sur le diaphragme. Nous avons dépensé du travail; nous pourrions donc légitimement nous attendre à une production de chaleur. C'est pourtant le contraire qui a lieu, et nous trouvons que cette dépense de travail nous coûte en apparence 24cal.,3, absolument comme quand le gaz avait élevé à 1m. de hauteur le poids moyen de 10328k.

Cet exemple nous montre clairement que, si dans une simple question d'équilibre ou de mouvement relatif à un corps, nous pouvons faire abstraction de deux forces quand elles sont égales et contraires, et ne nous occuper que de leur différence quand elles sont inégales et contraires, nous ne pouvons plus procéder ainsi dès qu'il s'agit d'une évaluation quantitative des forces réellement en jeu. Si nous ne connaissions point, au cas particulier, la totalité des forces qui s'annihilent sur la surface de notre piston, l'excès de force que nous dépensons pour le mouvoir ne nous semblera avoir aucune connexion mathématique avec l'abaissement de température qui a lieu dans le réservoir d'air.

Maintenant à quoi est due ici la dépense de calorique?

Nous avons fait abstraction complète de toute idée de masse quant au piston; nous avons fait abstraction même de l'idée d'une vitesse proprement dite, puisque c'est une autre force externe qui est venue déranger notre piston.

La dépense de calorique ne peut donc être due à une production de mouvement. Mais en déplaçant le piston, nous avons permis à toutes les molécules de l'air de se déplacer aussi, et de telle sorte que la somme de leurs déplacements est évidemment égale à celui du piston. C'est donc à la rupture de l'équilibre de position de l'ensemble des molécules qu'est due réellement la dépense de calorique : et cette dépense est proportionnelle au produit de la somme de tous les déplacements dans une même direction, par l'intensité d'action de la force calorique répondant à chaque déplacement infiniment petit.

En développant convenablement le second exemple que nous avons pris ci-dessus, celui d'un aimant qu'on approche ou qu'on éloigne de son armature, nous serions arrivés identiquement aux mêmes conséquences générales, à cette différence près qu'il s'agissait alors du déplacement d'un corps tout entier, et non d'un déplacement relatif de molécules. A chaque position relative de l'aimant et de l'armature répond une intensité donnée d'attraction magnétique (variable ou non, peu importe) et la position des deux corps ne peut être troublée par une raison quelconque sans que la force fournisse sa quote-part, absolument comme si elle agissait seule, et sans qu'un mouvement électrique vienne modifier ou troubler dans l'équilibre de position des corps soumis à la force magnétique. Mais ce qui, mieux que toute autre chose, prouve qu'il n'existe ici qu'une question de position, c'est que le courant marche dans un sens ou dans l'autre, selon que l'aimant s'approche ou s'éloigne de l'armature.

Entre le mouvement d'un corps et son déplacement il n'y a, à la vérité, pour ainsi dire, aucune distinction nominale, puisqu'il ne peut y avoir de déplacement sans mouvement; la distinction phy-

sique est au contraire immense. Un corps en repos, soumis à l'action d'une seule force, se meut de plus en plus vite : nous ne pouvons ici faire abstraction ni de la masse, ni de la vitesse ; et le mouvement, qui est ici l'effet exclusif de la force, doit représenter celle-ci à chaque instant. Un corps soumis à l'action de deux forces égales, peut se mouvoir ou ne pas se mouvoir ; s'il se meut, c'est par suite de l'intervention d'une cause étrangère. Dans ce mouvement nous pouvons faire abstraction de la masse ; il n'est qu'un accident, et constitue un *déplacement géométrique* plutôt que toute autre chose. Et cependant, dès que ce déplacement s'opère dans le sens de l'une ou de l'autre des forces en équilibre, il en résulte fort souvent une *consommation* réelle de l'une ou l'autre de ces forces, de celle dans la direction de laquelle s'opère le déplacement.

En somme, ainsi qu'il a été remarqué plus haut, les forces ont tout aussi bien pour fonction de régler la position relative des corps ou de leurs molécules, que de déterminer leur mouvement. Et la rupture d'une position donnée *coûte* de la force, tout aussi bien que le mouvement.

On voit, d'après les considérations précédentes, combien il est inexact de regarder les forces comme des *propriétés* de la matière. On voit aussi, et sous une forme nouvelle, que le mouvement d'un point matériel ne peut, à aucun titre, être regardé comme une *transformation* de la force quelconque qui l'a produit.

XVI. Qu'est-ce qu'un équivalent mécanique ? Existe-t-il un équivalent absolu et invariable ? Que signifient les variations de l'équivalent mécanique de la chaleur en particulier ?

Nous sommes maintenant à même de répondre très-nettement à toutes ces questions.

Nous avons vu, qu'en partant de la diversité des effets pour juger de la diversité des causes, nous pouvons diviser les forces en quatre espèces très-différentes.

1° Forces agissant à des distances infinies.

2° FORCES INTERMOLÉCULAIRES, dont l'action ne s'étend qu'à des

distances insensibles (ce qui ne signifie pas cependant que les actions deviennent effectivement nulles à des distances finies).

3° Forces immobiles et invariables, ou permanentes.

4° Forces variables et pour ainsi dire mobiles.

Les forces immobiles ou permanentes, qu'elles soient moléculaires ou agissant à distances sensibles, n'ont (pour nous et dans l'état actuel de nos connaissances) que deux manières d'agir :

1° Déterminer le mouvement dans la matière ; 2° ou maintenir l'équilibre et la coordination relative des corps ou des parties de corps. Lorsque par exemple la gravitation détermine le mouvement d'un corps, lorsqu'un corps qu'elle sollicite vers un autre peut obéir à cette action, lorsqu'un corps tombe par exemple vers la terre, nous ne savons nullement si le principe qui se manifeste ici comme cause de mouvement éprouve quelque modification générale par suite de ce mouvement.

Il n'en est point ainsi des forces variables ou mobiles ; elles ont un mode de manifestation double, dont l'une est tellement caractéristique qu'elle masque pour ainsi dire l'autre. La lumière, la chaleur, l'électricité, ont été connues comme agents de relation entre les corps, comme agents de sensation chez les êtres vivants, bien avant d'être considérées comme de vraies forces.

Entre les mouvements (vibratoires ou autres) qui nous manifestent ces principes sous des noms spéciaux, et les puissances virtuelles qui nous les manifestent comme forces, il est, avons-nous dit, une connexion intime telle qu'à chaque changement de position qu'ils déterminent dans les corps comme forces répond un mouvement spécial.

Ce mouvement peut donc être regardé comme représentant la *quantité d'équilibre* rompue par la force, et comme représentant la quantité même de *force consommée*. C'est en ce sens, et seulement en ce sens, que nous pouvons dire qu'un travail exprimé soit en force vive, soit en poids élevé à une certaine hauteur, est l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur, de l'unité de l'électricité.

Si nous pouvions isoler les forces et les faire agir une à une sur une même masse matérielle parfaitement libre de se mouvoir; ou du moins si nous pouvions les mettre en opposition deux à deux, un très-petit nombre d'expériences bien faites nous permettrait d'établir, à l'aide d'une unité connue, le rapport défini qu'elles ont entre elles. Et ce rapport, lorsqu'il concernerait l'une ou l'autre de nos forces mobiles, deviendrait *l'équivalent mécanique absolu* de la chaleur, de l'électricité, de la lumière même.

En réalité, nous ne pouvons jamais isoler ainsi les forces et les faire agir une à une, ou même deux à deux, sur un mobile : 1° cela est très-clair d'abord quant aux forces qui agissent à distances indéfinies. A la surface de la terre tous les corps sont soumis à l'action de la gravitation; c'est donc une force qui s'ajoute positivement ou négativement à celles que nous faisons agir à distance aussi sur un corps donné. Cependant ici, et expérimentalement parlant, il est facile de démêler ce qui appartient à chacune; et si l'électricité, par exemple, n'agissait pas la plupart du temps d'une manière ou d'une autre sur les molécules mêmes des corps, en même temps qu'elle se manifeste au dehors comme force attractive ou répulsive, nous pourrions toujours assez exactement évaluer les effets des mouvements qui lui sont dus; 2° cela est très-clair aussi pour tout ce qui concerne les forces moléculaires, et ici il en résulte une difficulté que pour le moment il n'est pas encore possible de vaincre.

Un corps quelconque solide, liquide ou gazeux, peut et doit être considéré comme un aggrégat de parties matérielles (indivisibles ou divisibles à l'infini, peu importe ici), réunies et *mises en rapport* constant par l'action de deux forces au moins. L'une attractive, qui fait que tout corps résiste plus ou moins aux efforts externes tendant à agrandir son volume apparent et qui fait qu'il reprend ce volume, dès que l'effort cesse; une force répulsive qui le fait résister, comme volume, aux efforts de compression, et le ramène aussi à ce volume, dès que l'effort cesse. Nous disons deux forces au moins; il serait en effet très-inexact de limiter à ce minimum le nombre des forces actuellement éveillées dans un corps quelconque. Ainsi, quand

l'oxigène passif se trouve changé en *oxigène actif*, en ozône, par l'électricité; quand le chlore passif se trouve changé en *chlore actif*, par la lumière, ces corps sont certainement dans un état dynamique nouveau, et pour déterminer cet état, il faut une dépense de mouvement électrique ou luminique proportionnelle à l'activité acquise par le gaz : et cependant, pour nous, ceux-ci ne diffèrent en rien, sinon par leur activité de leur état antérieur.

Nous nous trouvons ainsi vis-à-vis des corps en général, dans la situation où nous étions vis-à-vis de notre diaphragme, lorsque nous ignorions la valeur des pressions égales agissant sur ses deux faces. Nous ignorons et le nombre et l'intensité des forces qui agissent à chaque instant sur les molécules des corps de manière à les tenir en équilibre; et lorsque nous employons un mouvement d'un impondérable à développer de la force motrice, ou réciproquement, lorsque nous employons une force motrice à développer un mouvement dans un impondérable, la force motrice produite ou dépensée ne peut jamais être qu'une addition faite à une autre force motrice *inconnue* qui se produit ou se dépense dans les corps. Si nous chauffons, par exemple, une barre métallique, il s'y développe, par le fait de la dilatation, un travail dont la somme est égale au chemin total parcouru par les molécules, multiplié par la moyenne des intensités successives de la force qui donne au métal sa cohésion moyenne dont nous ignorons la valeur; si nous employons maintenant la dilatation de cette barre à soulever un fardeau, ou à mettre une masse matérielle en mouvement, il faudra sans doute dépenser plus de calorique pour obtenir le même échauffement; mais il n'y a aucune raison pour admettre que l'excès dépensé réponde à l'excès de force produit, dans le même rapport que la somme totale de calorique dépensée répond à la somme totale et inconnue de force développée.

Et ainsi encore, lorsque nous dépensons de la force motrice à augmenter le volume d'un corps solide, nous ne faisons en définitive qu'aider à une force répulsive *mobile* qui tendait déjà à agrandir le corps; et celui-ci, bien loin de s'échauffer, comme nous étions autorisés en apparence à le croire, puisque nous dépensons de la force motrice, celui-ci, disons-nous, se refroidit d'une quan-

tité proportionnelle à la quantité inconnue de travail que développe la force calorique, en dilatant le volume apparent du corps.

En somme, nous voyons qu'il nous est impossible d'arriver directement et expérimentalement à la détermination de l'ÉQUIVALENT ABSOLU de la chaleur ; et que nous ne pouvons réellement connaître que des *équivalents relatifs* qui varient d'un ordre de phénomènes à l'autre, comme l'intensité inconnue des forces auxquelles sont nécessairement soumises les parties matérielles des corps, et qui peuvent recevoir le nom d'*équivalents expérimentaux*.

La variabilité de l'équivalent mécanique *expérimental* de la chaleur n'entraine donc en rien du tout l'idée d'une perte de mouvement ou de force vive qui se ferait dans l'intérieur du corps ; bien moins encore entraine-t-elle l'idée d'une transformation incomplète de la chaleur en force motrice ou de la force motrice en chaleur. Et si maintenant quelque chose peut nous étonner, si quelque chose réclame une explication, ce n'est plus cette variabilité, mais c'est bien plutôt son peu d'amplitude réelle. Mais arrêtons-nous d'abord sur quelques remarques très-importantes qui découlent de ce qui précède.

XVII. Nous disons que l'équivalent absolu de la chaleur par exemple, c'est le rapport qui existe entre le *mouvement calorique* produit ou annihilé, et la *quote-part* pour laquelle la force calorique a concouru à une rupture d'équilibre entre les parties matérielles d'un corps. L'équivalent relatif est le rapport qui existe entre ce même mouvement et l'excès de force motrice négative ou positive, mais *connue*, que cette rupture a produit au dehors du corps. Il suit de là que l'équivalent relatif ne saurait lui-même être une fonction du temps que met un phénomène à s'accomplir. D'un autre côté cependant, le travail mécanique, tel que nous le mesurons, implique forcément l'idée de durée.

Lorsque nous élevons par exemple un fardeau, le travail exécuté est en raison directe de la hauteur à laquelle nous l'élevons en un temps donné, ou en raison inverse du temps qu'il faut pour l'élever à une hauteur donnée. Il découle de là

1° Que l'équivalent relatif est indépendant de la *rapidité* que met un phénomène à s'accomplir.

Dans les frottements, l'équivalent relatif doit donc rester invariable, quelle que soit la vitesse relative des surfaces en regard. Lorsque nous nous transportons à une certaine hauteur, la chaleur consommée dans notre corps doit rester proportionnelle au travail développé, quelle que soit la vitesse de notre marche, etc.

Ces différents faits, on se le rappelle, ont été vérifiés à l'avance par l'expérience.

2° De cette proposition en découle une autre, qui n'est qu'un corollaire. Puisque dans un même ordre de phénomènes, il y a proportionnalité entre le travail et le mouvement calorique, il doit exister un rapport constant d'un équivalent relatif à autre.

C'est aussi ce que l'expérience laisse clairement apercevoir.

3° Tout ce qui modifie la position relative des molécules, *avant que le travail ne commence*, peut modifier la valeur de l'équivalent relatif.

Tel est, par exemple, l'effet des variations de la pression dans les frottements.

XVIII. Dans l'état actuel de nos connaissances sur le nombre et sur l'intensité des forces qui agissent incessamment sur les parties matérielles des corps, de manière à les tenir en équilibre, il nous est impossible de déterminer *à priori* la valeur d'un équivalent relatif quelconque. D'un autre côté, nous avons vu que la valeur de l'ÉQUIVALENT ABSOLU ne peut être obtenue directement par expérience. Il semble donc que la connaissance de ce dernier soit entièrement hors de notre portée.

Et cela est vrai, pour le moment, rigoureusement parlant.

Cependant il est tout aussi certain que nous pouvons déjà savoir quel est le genre de phénomènes dont l'étude expérimentale nous rapprochera le plus de cette connaissance.

1° On a admis pendant fort longtemps que dans les gaz l'attraction moléculaire est absolument nulle, et que la force répulsive du calorique y est seule à considérer. S'il en était ainsi, il est clair qu'une seule expérience bien faite sur un gaz quelconque nous donnerait la valeur réelle de l'équivalent absolu de la chaleur ; car la force motrice que nous produirait la détente de ce gaz et la force motrice que coûterait la compression, seraient les seules à mettre en rapport avec le mouvement de l'impondérable corrélatif. Cette idée si simple que l'on avait de l'état des forces internes des gaz, reposait sur les lois empiriques que l'on connaissait alors concernant ces corps, lois qui en elles-mêmes étaient excessivement simples aussi. Les expériences si précises de quelques observateurs modernes, entre autres celles de M. Regnault, ayant prouvé qu'il règne dans ces lois plus de complication qu'on ne le pensait, il est clair que l'opinion première des physiciens ne peut plus être considérée comme rigoureusement juste.

Lorsque nous comprimons un gaz, l'attraction moléculaire nous *aide* certainement pour une fraction inconnue, si petite qu'elle soit d'ailleurs ; et dès lors la totalité de la chaleur produite ne peut plus être mise en rapport uniquement avec la force motrice que nous dépensons.

Cependant il y a ici au moins une grande approximation à espérer, et c'est en tout cas dans l'étude des gaz que l'analyse mathématique a plus de prise et prête le mieux *son secours critique* à l'expérimentateur.

2° Nous avons dit que le calorique ne se manifeste comme force que dans l'intérieur des corps, et quand le mouvement vibratoire y a été absorbé en quelque sorte sous forme diffuse. La réciproque doit donc être vraie aussi, et toutes les fois que la force calorique vient être annulée ou rendue *inutile* par un changement complet dans la position respective des molécules, il doit se reproduire un mouvement calorifique qui représente la quantité d'action dynamique annulée. C'est par exemple ce qui arrive lorsque nous déchirons un corps solide, soit avec la lime, soit avec le foret. La force calorique en équilibre avec l'attraction moléculaire est rendue en-

tièrement *inactive*, et par suite libre, dans ces cas, et se traduit d'une manière sensible à l'extérieur par une production de chaleur ; et comme la force motrice dépensée est à peu près exclusivement employée à surmonter les actions partielles de l'attraction moléculaire, il s'ensuit que le rapport trouvé expérimentalement entre cette force dépensée et la chaleur produite, doit être fort approchée de la valeur de L'ÉQUIVALENT ABSOLU.

Ce rapprochement entre les résultats probables de l'étude de deux genres bien opposés de phénomènes, semble en harmonie avec l'expérience. De tous les *équivalents relatifs* ou *expérimentaux* de la chaleur les plus rapprochés, est celui que donne le forage du fer par exemple (p. 123), et celui vers lequel converge l'ensemble des essais qu'on a faits jusqu'à présent sur les gaz permanents.

Si l'on peut entrevoir quels sont les phénomènes qui doivent nous permettre d'approcher de la valeur de l'équivalent absolu de la chaleur, il est aisé aussi de prévoir quels sont ceux qui nous en éloigneront le plus. De ce nombre est visiblement tout ce qui concerne la dilatation des solides ou des liquides par la chaleur, la conversion des solides en liquides et des liquides en gaz, la détente des vapeurs à leur *maximum* de tension ou peu au-dessus. Ne nous arrêtons que sur deux cas spéciaux et particulièrement intéressants qui nous amèneront à établir un dernier parallèle entre la théorie de Carnot et celle du Dr Meyer : il s'agit du passage des liquides à l'état de vapeur et de la détente de cette vapeur.

1° Lorsqu'un liquide quelconque, lorsque l'eau par exemple est soumise à une pression *constante* et qu'elle se trouve en rapport avec une source continue de calorique, sa température, après s'être graduellement élevée, devient tout d'un coup stationnaire. La tendance du liquide à se vaporiser étant devenue égale à la pression constante supportée, *l'eau bout et se convertit en gaz.*

La quantité de chaleur ou de mouvement calorique, devenue ainsi force répulsive, nous est donnée aujourd'hui très-exactement par la formule empirique que M. Regnault a tirée de ses expériences. Pour convertir 1k d'eau à 0° en vapeur à une atmos-

phère par exemple, il nous faut 637 unités de chaleur ; mais puisqu'il nous faut déjà 100 unités pour élever notre kilog. de 0° à 100°, il s'ensuit que la production de la vapeur coûte 537 calories.

Mais puisque le déplacement des molécules se fait sous l'action de deux forces contraires en équilibre, il se produit un *travail mécanique*. Une partie de ce travail nous est connue : un kilog. d'eau, en passant en vapeur à $1^{at.}$, soulève de fait à $1^{m.},698$ un poids de 10333 kilog., ce qui nous donne $17424^{k.m.},768$ de travail.

En divisant ce travail par les 537 calories dépensées, nous avons pour équivalent mécanique relatif $32^{k.m.},6$, nombre qui est à peine le treizième de l'équivalent relatif aussi, donné par la désagrégation du fer ($425^{k.m.}$). On sait que la force calorique est en grande partie dépensée à surmonter des forces internes au corps. On a coutume de dire que, dans les liquides, l'attraction moléculaire est nulle : c'est là une affirmation gratuite.

Ce qui est en effet presque nul dans ces corps, c'est la *cohésion*. Mais la cohésion n'est que la résultante de deux forces opposées, l'attraction moléculaire et la répulsion calorifique, et ces deux forces peuvent au contraire être très-intenses. Un très-petit déplacement moléculaire peut donc, *à notre avis*, représenter un travail très-considérable, même dans un liquide sans cohésion.

2° Nous avons vu que les expériences faites sur les gaz permanents doivent nous faire approcher de la valeur de l'équivalent absolu de la chaleur. Mais ce que nous appelons un gaz n'est autre chose qu'une vapeur élevée, en général, de beaucoup au-dessus de sa tension *maxima* par la *force calorique*. Si nous opérons sur des vapeurs proprement dites, ou même légèrement surchauffées, nous arrivons à des résultats au contraire très-différents. Ainsi la vapeur d'eau, par exemple, nous donne tout au plus $160^{k.m.}$ pour l'équivalent relatif le plus élevé. Expérimentalement parlant, ce résultat établit une différence notable entre la vapeur saturée et les gaz proprement dits ou vapeurs chauffées beaucoup au-dessus de la température répondant au point de saturation. Quant à la vapeur d'eau, cette différence se montre sous une autre face par un phénomène singulier qui a été cité ailleurs (page 144).

Quoi qu'il en soit, si, d'une part, la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, relatif ou absolu, peut encore être regardée comme très-difficile théoriquement, en raison du peu d'étendue de nos connaissances actuelles sur les forces qui régissent l'équilibre interne des corps, il est, d'autre part, visible que l'étude expérimentale de l'équivalent permettra, dans un avenir très-prochain, de pénétrer très-avant dans cette connaissance du secret de la structure interne des corps. En ce sens, on peut dire que la conception du Dr Meyer, dégagée des systèmes préconçus dont on l'a rendue inutilement solidaire, est une des plus belles conquêtes des sciences modernes, et qu'elle nous ouvre un horizon nouveau, non seulement au point de vue expérimental, mais encore et surtout peut-être, au point de vue métaphysique.

XIX. Mettons maintenant une dernière fois en regard les théories de Carnot et du Dr Meyer, ainsi que les doctrines de physique sur lesquelles elles reposent ou que l'on en a déduites.

En tout premier lieu, il y a incompatibilité absolue entre la variabilité réelle de l'équivalent mécanique expérimental de la chaleur par exemple, et l'hypothèse qui assimile tous les phénomènes du calorique à des mouvements de la matière pondérable même ; car dans cette hypothèse, la variabilité de l'équivalent entraîne l'idée de la possibilité d'une perte de force vive dans l'intérieur des corps, ce qui est en opposition non seulement avec le point de départ de l'hypothèse elle-même, mais encore, et surtout, avec la raison.

La production de la force motrice dans nos machines, la production du mouvement et du repos dans la nature en général, ne peuvent, à aucun titre, être attribuées à une simple communication de mouvements préexistant dans les molécules matérielles.

Telle est l'élimination la plus radicale qu'il y ait à opérer dans l'une de nos doctrines, et dans la théorie des forces qui lui est parallèle. Une fois cette élimination opérée, il est aisé de parvenir à une doctrine en harmonie complète avec les faits.

D'un autre côté, la doctrine ancienne de physique, d'où Carnot a

fait découler sa théorie des machines à feu, demande à être modifiée tout aussi radicalement. L'idée d'une indestructibilité de la chaleur, qui forme la base de la doctrine et de la théorie, ne peut en effet point se soutenir devant la réalité des phénomènes, et tous les termes de nomenclature qui dérivent de cette idée sont faux.

Lorsque l'eau (ou tout autre liquide) est arrivée au point d'ébullition, au point où la tension de la vapeur fait équilibre à la pression supportée, la température ne s'élève plus par suite d'une addition de calorique, mais le liquide se convertit en gaz. On a nommé *calorique latent* le calorique ainsi consommé, puisqu'on le croyait caché en quelque sorte entre les molécules, et qu'on admettait qu'il était toujours disponible en totalité. Carnot a pu, sans contre-sens, partir de cette supposition pour dire que dans une pompe à vapeur la force est produite par un transport de calorique d'un lieu à un autre, et en vertu d'une chute de température.

Nous voyons jusqu'à quel point cet énoncé doit être modifié maintenant. Supposons, pour présenter sous la forme la plus frappante l'ensemble du phénomène, supposons que la chaudière d'une machine à vapeur ne soit frappée que par le calorique rayonnant du foyer. Au dehors du générateur, l'impondérable se manifeste exclusivement par un mouvement qui, pour nous, constitue la chaleur; dans l'intérieur du liquide il agit exclusivement comme force. Le terme de calorique latent ne peut plus même être employé comme convention de langage, car il implique une idée fausse de la réalité des faits. Au point de vue de la physique, si nous ne voulons connaître le calorique que comme chaleur, il n'est pas seulement latent dans la vapeur, mais il n'y est plus; si nous ne voulons le connaître que comme force, il n'existe pas en dehors de la vapeur; nous ne pouvons donc voir dans ce que nous appelons calorique qu'un double mode de manifestation parfaitement corrélatif d'un même principe partout existant, et différent de la matière des corps. Au point de vue dynamique, nous arrivons exactement aux mêmes conséquences.

Nous avons prouvé surabondamment que ce n'est point le mouvement du calorique qui pousse le piston d'une machine à vapeur.

Est-ce la force calorique qui pousse ce piston? Non, car cette force est nécessaire à l'existence de la vapeur et ne peut produire deux effets égaux en même temps; mais nous disons que l'ensemble des phénomènes du calorique dérive d'une manifestation double d'un même principe. A titre de puissance dynamique, la force calorique est essentiellement intermoléculaire. A tout mouvement calorifique qui devient *diffus* entre les molécules des corps, répond une action dynamique de la force sur les molécules; et réciproquement, à tout déplacement des molécules soumises à l'action de la force calorique, répond un mouvement de l'impondérable équivalent au produit de la somme des déplacements par l'intensité de la force. Le déplacement du piston n'est que la conséquence des déplacements moléculaires, et il exprime exactement la somme de ces déplacements; mais sa résistance au mouvement ne représente qu'une partie de l'intensité de la force calorique employée aussi dans les corps à faire équilibre à des forces internes.

Mais quelle est la quantité de calorique que nous devrons retrouver, lorsque nous condenserons la vapeur qui nous a ainsi fourni du travail par le fait même de sa formation? La théorie de Carnot nous dit que nous devons trouver l'intégralité du calorique dépensé; la théorie moderne nous dit que nous devons avoir un déchet de chaleur proportionnel au travail produit et égal au quotient de la division de ce travail par l'équivalent mécanique. En point de fait l'expérience seule pouvait répondre ici. Elle répond d'une manière complexe, comme nous avons vu (si mes recherches ont été exactes ou même seulement approximatives) [1]. Il y a déchet, lorsqu'on condense la vapeur par le refroidissement du cylindre où elle a sou-

[1] L'intervention de la personnalité d'un écrivain dans un travail philosophique est presque toujours déplacée et inconvenante. Je pense qu'ici elle n'a point ce caractère, et qu'elle résulte d'un devoir scientifique à remplir. Je l'ai dit ailleurs et je le répète : le métaphysicien peut, sans aucun inconvenient, garder un langage net et tranchant, puisqu'il est sûr d'être réfuté promptement quand il se trompe. L'expérimentateur, *que l'on croit temporairement sur parole*, à raison de la conscience et de l'habileté qu'on lui suppose, commet *un abus de confiance* lorsqu'il affirme d'une manière trop hardie ce que lui *seul* encore a vu : eût-il même vu juste.

levé le piston ; 2° il n'y a nul déchet, lorsqu'on la laisse se précipiter dans un récipient séparé et tenu froid.

En poussant à l'extrême le doute sur l'exactitude expérimentale de cette réponse complexe et bizarre ; en faisant le sacrifice complet de toutes les affirmations *en apparence paradoxales* que j'ai présentées dans ce travail, comme observateur, on arrive pourtant à ces deux conclusions essentielles :

1° Si la théorie de Carnot a raison en disant qu'il n'y a nul déchet dans une machine sans détente, ce n'est plus que *fortuitement*, car elle s'appuie, dans son affirmation, sur un point de départ faux ; elle admet l'indestructibilité du calorique comme chaleur, comme *manifestation thermique* : or cette indestructibilité n'est plus admissible aujourdhui.

2° Si la théorie moderne avait raison, en disant qu'il y a déchet dans une machine à vapeur même sans détente, ce ne serait aussi que *fortuitement*, car l'hypothèse qui condamne la théorie à cette affirmation est réfutée par des milliers d'autres preuves.

En acceptant comme vraie la réponse expérimentale complexe donnée plus haut, on voit clairement aussi de quelle manière forcée la théorie moderne se concilie avec celle qui l'a précédée ; on aperçoit ce qui est vrai dans les deux à la fois et ce qui les unit comme interprétation des lois de l'équilibre en général. Et l'ensemble des faits les plus positifs nous prouve que toute doctrine qui ne voudra regarder le calorique que comme un mouvement, ou que comme une source de force motrice exclusivement, serait insuffisante.

Et ce qui est vrai du calorique dont nous nous sommes plus spécialement occupés jusqu'ici, l'est aussi, et à bien plus forte raison, des autres forces, telles que l'électricité, la lumière, etc. C'est ce qui ressortira bientôt sous un nouveau jour. Mais plaçons-nous d'abord à un point de vue plus élevé et plus général.

XX. Il existe un équivalent mécanique absolu de la chaleur ; il existe un équivalent absolu de l'électricité, etc. C'est-à-dire qu'à chaque rupture de l'équilibre de la matière répond un mouvement

calorique, électrique, lumineuse, qui équivaut à la force capable de provoquer cette rupture. Il résulte implicitement de là qu'il existe un équivalent électrique du calorique, un équivalent calorifique de l'électricité, etc. Mais cette conséquence est indirecte, et a en quelque sorte la matière pour intermédiaire; or ce n'est pas seulement de cette manière détournée que les principes impondérables se trouvent en rapport ensemble dans leurs manifestations variées.

Nous avons trouvé qu'il existe un équivalent mécanique de la chaleur humaine; or, à aucun titre, le moteur vivant ne peut être assimilé à un moteur à feu; ce n'est point la chaleur qui détermine les contractions musculaires, et pourtant la chaleur est le produit le plus direct de la respiration; s'il disparaît de la chaleur en nous à chacun de nos mouvements, ce ne peut être que parce qu'il existe une relation d'équivalence directe entre le calorique et le principe qui, sous l'empire de la volonté, va contracter les muscles moteurs (principe que les belles recherches de M. Du Bois-Reymond ne nous permettent plus de distinguer de l'électricité). Ce qui devient tous les jours plus évident, c'est qu'il n'est pas un seul phénomène de rupture d'équilibre dans les corps, ou au dehors des corps, où l'on ne voie apparaître, soit à la fois, soit tour à tour, la chaleur, l'électricité, la lumière, et lorsqu'un de ces principes est une fois éveillé, il peut à son tour éveiller ses congénères; dans mille et mille circonstances où les corps ne servent alors plus que de théâtre, de lieu aux manifestations, et où la matière ne joue plus qu'un rôle tout secondaire. C'est cet ensemble de réactions qui est aujourd'hui étudié avec tant de zèle et d'habileté par un grand nombre d'observateurs, sous le nom de *corrélation des forces physiques*.

Cette dénomination est à la fois exacte et éminemment expressive, lorsqu'on laisse au mot de force son véritable sens; elle devient impropre lorsqu'on confond la force avec le mouvement de la matière même.

On peut en effet admettre, à la rigueur, qu'il n'existe qu'un seul principe capable de se manifester par des modifications de mouvement, soit comme lumière, soit comme chaleur, etc.; tout somme

on peut admettre qu'il existe plusieurs principes qui, par des mouvements analogues, donnent lieu l'un aux phénomènes électriques, l'autre aux phénomènes lumineux, etc.

Nous nous bornons pour le moment à faire remarquer que, sur des millions de faits connus, qui prouvent l'analogie de nature de ces principes, il n'en est pas un seul encore qui prouve leur identité, qui prouve que l'électricité par exemple soit une transformation effective du mouvement calorique, et non pas le résultat d'une simple corrélation.

Il s'agit ici d'une question de faits qui ne peut être résolue qu'à l'aide de l'étude scrupuleuse des phénomènes; et il y a tout lieu d'espérer qu'elle ne tardera pas à l'être. Il est essentiel de remarquer que, relativement à nous, il ne résulterait aucune simplification réelle de cette réduction des forces à une seule; car à la diversité des phénomènes, qui est un fait, répond nécessairement une cause; et lorsque nous aurons ramené toutes les causes de mouvements, toutes les forces à une seule, nous serons condamnés à imaginer *de nouvelles causes de diversité*, pour comprendre la réalité des phénomènes.

Mais nonobstant la solution de ce grand problème, il est un ensemble de propositions dont la vérité est hors de doute maintenant déjà (et en ne conservant même de *noms spéciaux* que par abréviation de langage) :

1° Le calorique, l'électricité sous toutes ses formes, la lumière, pas plus qu'aucune autre force, ne peuvent être considérés comme des mouvements de la matière même;

2° Ils ne peuvent être considérés non plus comme des *formes* diverses de la matière;

3° Ils dérivent d'un ou de plusieurs principes naturels partout existants, et totalement différents de la matière;

4° Ce n'est point à titre de mouvements qu'ils tirent la matière du repos, ou qu'ils l'y font rentrer;

5° Mais ils sont capables de mouvement; et à chacun de leurs mouvements répond la manifestation d'une *force attractive* ou *répulsive*, *générale* ou *intermoléculaire*, capable de tirer la matière du repos ou de l'y faire rentrer; et, à chaque manifestation effective, comme force, à chaque rupture d'équilibre, répond en eux un mouvement *équivalent* à la quantité d'équilibre rompu;

6° Les mouvements dont ils sont capables font de ces principes des agents de relation entre les corps (animés ou inanimés), ou entre les parties des corps; ils nous les rendent sensibles, et c'est à eux, plutôt qu'aux principes dans lesquels ils ont lieu, qu'on a donné jusqu'ici le nom de lumière, de chaleur, d'électricité. Mais ces mouvements servent surtout à déterminer, en des lieux différents dans l'espace, la manifestation de forces dont sont capables aussi les principes, et nous permettent de leur donner, comme puissances dynamiques, le nom de FORCES MOBILES : pourvu qu'à cette qualification nous nous gardions d'ajouter l'idée d'un transport réel;

7° La loi d'équilibre qui préside à l'action de toutes les forces, la loi d'équivalence qui préside à leurs actions dynamiques, excluent à jamais de la mécanique la possibilité du mouvement perpétuel : rien ne se crée dans la nature, mais rien non plus ne s'y perd. Et ces mêmes lois impliquent la perpétuité d'un mouvement *une fois existant*.

La mobilité de certaines forces nous fait en outre entrevoir la raison de la variété infinie des phénomènes dont l'univers est le tableau.

L'étude expérimentale de la chaleur, de l'électricité, de la lumière, comme puissances dynamiques, peut être à juste titre considérée comme une des plus grandes conquêtes des sciences modernes. Elle a, pour nous, tiré les forces du domaine de l'abstraction philosophique, pour les ramener dans la réalité de l'existence. La faculté de manifestation double, que nous avons admise pour les principes appelés jusqu'ici (et avec raison) impondérables, peut sembler une hypothèse, légitimée et justifiée cependant par l'étude des phénomènes, lorsqu'il s'agit d'une force intermoléculaire, comme

[illegible] par exemple, ici nos sens ne peuvent plus mesurer les intervalles qui séparent le mouvement de l'impondérable de son point d'action comme puissance dynamique, et la raison seule peut nous faire admettre la possibilité de ces intervalles. Lorsqu'il s'agit d'une force mobile agissant à intervalle sensible, cette faculté cesse de nous apparaître comme une hypothèse, et n'est plus que l'expression d'un fait incontestable.

Un courant électrique agit à distance indéfinie sur un autre courant, et tout point géométrique d'un courant peut être considéré comme le foyer d'une force attractive ou répulsive dont l'intensité décroît en raison inverse du carré des distances. C'est de ce simple fait (et non de *cette hypothèse*) que le génie d'Ampère a su tirer toute une science aussi précise que les mathématiques mêmes : l'électro-dynamique.

Ce qui se passe au point même, ce qui constitue le courant, ne peut s'expliquer que par un mouvement. Ce qui se passe autour du point, si près ou si loin de lui qu'on voudra, *ce qui constitue la force*, ne peut s'expliquer *par aucun mouvement*. Et comme les deux faits coexistent, ou sont dans un état parfait de connexion, nous pouvons et nous devons les attribuer à une manière d'être double d'un même principe que nous nommons l'électricité. Mais ce qui est vrai de l'un des principes impondérables, l'est pour tous au même titre et en dehors de toute hypothèse.

L'une de ces manières d'être tombe sous nos sens et peut, par suite, être figurée dans ses résultats géométriques : c'est le mouvement. L'autre, par son essence même, échappe entièrement à nos sens, et ne peut être que conçue par l'intelligence : c'est la force.

Pendant bien longtemps encore, sans doute, l'esprit humain fera des efforts pour pénétrer ce mode d'action, dont la raison et l'étude des phénomènes lui prouvent la réalité ; pendant bien longtemps encore il cherchera à *voir*, comment, sans aucun mouvement antérieur, la force peut tirer la matière du repos. Et toutes les fois qu'il cherchera à expliquer cet acte de la force par un autre mouvement préexistant, il reculera sur lui-même pour trouver une cause anté-

rieure à ce mouvement. Il en est de la notion pure de force comme de certains axiomes de mathématiques. L'homme le plus simple les conçoit dans toute leur plénitude; l'animal même les perçoit en quelque sorte; et cependant, dès que nous voulons les prouver, ils s'obscurcissent pour nous comme vérités.

Il n'a jamais été logique, à aucune époque du développement de la science, de confondre le mouvement avec la force, ou de prendre la force pour un mouvement; il l'est moins aujourd'hui que jamais. Comment se fait-il cependant que tant d'esprits éminents aient aujourd'hui plus que jamais cette tendance? Pourquoi sont-ils systématiquement hostiles à la conception de force proprement dite, sentie comme nécessité par tous les hommes, et ramenée dans le domaine des vérités absolues par les deux génies qui ont su faire de l'infini un instrument mathématique? Pourquoi nient-ils ce que Newton et Leibnitz ont cru à l'abri d'un doute? C'est ce qu'il importe maintenant de rechercher, mais sous une forme beaucoup plus générale que celle que comporte une étude de physique-mécanique.

CHAPITRE XI.

CONCLUSIONS PHILOSOPHIQUES GÉNÉRALES.

ESSAI DE MÉTAPHYSIQUE EXPÉRIMENTALE.

> L'unité d'une de nos œuvres d'art finies, et l'unité de cette œuvre d'art infinie et admirable, qui s'appelle l'Univers, résultent de l'harmonie dans la diversité, et non de l'identité des parties.

CHAPITRE VI.

CONCLUSIONS [illegible]

[illegible]

Il n'est plus guère de [illegible] cœur sérieusement l'utilité [illegible] physiques ou naturelles [illegible] arts en général [illegible] ment contribué [illegible] être dans nos [illegible] la puissance d'action [illegible] influence salutaire [illegible] esprits habitués [illegible] à tirer en positif [illegible] d'être certain [illegible] forces à venir que l'homme [illegible]

Les sciences cependant [illegible] bien plus élevés une [illegible] peut contribuer à leurs progrès [illegible]

A mesure que chacune d'elles [illegible] cercle des faits particuliers qu'elle [illegible] sont rapprochées les unes des autres [illegible] se sont confondues : les faits d'abord [illegible] d'elle, sont bientôt devenus communs [illegible] des sciences voisines. Si l'idée d'une science [illegible]

CHAPITRE XI.

CONCLUSIONS PHILOSOPHIQUES GÉNÉRALES.

Essai de métaphysique expérimentale.

Il n'est plus guère de personnes de nos jours qui contestent encore sérieusement l'utilité matérielle de l'ensemble de nos sciences physiques ou naturelles. Par leurs applications à l'industrie, aux arts en général, à la navigation, etc., ces sciences ont trop évidemment contribué à diminuer la souffrance, et à augmenter le bien-être dans nos sociétés ; elles ont trop manifestement étendu et accru la puissance dominatrice de l'homme sur cette terre, pour que leur influence salutaire puisse être niée par d'autres que par quelques esprits maladifs ou retardataires. Et il faut le dire, s'il est un reproche à faire au public, même lettré, mais peu scientifique encore, c'est d'être enclin à s'exagérer plutôt qu'à diminuer les secours et les forces à venir que l'homme pourra puiser dans ces sciences.

Ces sciences cependant ont une autre utilité bien plus noble, bien plus élevée; une utilité qui donne à leur étude, à tout ce qui peut contribuer à leurs progrès, un caractère sacré.

A mesure que chacune d'elle s'est développée, à mesure que le cercle des faits particuliers qu'elle renfermait s'est agrandi, elles se sont rapprochées les unes des autres, leurs limites très-tranchées se sont confondues : les faits, d'abord classés nettement dans l'une d'elle, sont bientôt devenus communs, ou tout au moins tributaires des sciences voisines. Si l'idée d'une science unique et universelle se

présente encore aujourd'hui comme trop difficile à réaliser, déjà cependant n'est-elle plus un rêve aux yeux des esprits les plus positifs. En tous cas est-il certain qu'il n'est plus possible de n'être que chimiste, ou physicien, ou astronome, ou physiologiste, etc., etc., isolément, et que celui qui n'aurait pas de notions étendues de toutes ces sciences réunies ne peut plus prétendre en rien à contribuer aux progrès de l'une d'elles en particulier.

Mais à mesure que leurs limites se rapprochent et se confondent ainsi, leur niveau commun s'élève.

De l'étude du fait particulier, elles marchent rapidement vers celle des faits communs et généraux, vers celle des lois qui expriment la forme d'un ensemble de phénomènes, vers celle des causes. Elles tendent de plus en plus à ramener dans le domaine de l'observation, ce qui jusqu'ici avait été considéré comme complètement en dehors de ce domaine, ce qui n'avait été abordé que par la spéculation, soit arbitraire, soit intuitive, soit mystique. Elles tendent à créer enfin une métaphysique, une philosophie naturelle, expérimentale et par cela même indestructible.

Et c'est là, disons-le hardiment, le caractère vraiment grand et utile que revêt l'étude de la nature abordée par l'observation stricte et rigoureuse des phénomènes.

Quelques personnes, cela est certain, appelleront dangereux ce que nous appelons ici utile et grand ; quelques-unes nommeront audacieux et impossible ce que d'autres croient déjà presque réalisé ; quelques-unes repousseront, de crainte de se fatiguer, ce travail suprême que d'autres poursuivent avec toute l'énergie de leur pensée.

Il serait facile d'opérer ici encore la classification des individus en catégories, et de remonter aux causes.

Mais quoi qu'il en soit de ces causes, et quelque soit le degré de sympathie ou d'antipathie que puisse avoir chacun pour ce côté philosophique des sciences, il est certain qu'après avoir stationné un temps suffisant dans le domaine des faits isolés, elles tendent à

pénétrer, armées de toutes pièces, dans le domaine beaucoup plus élevé de l'interprétation philosophique et générale.

Tel esprit des plus rigoureux, des plus positifs, qui dans une discussion se croit posé sur le terrain de la physique pure, par exemple, est promptement amené malgré lui et par une pente naturelle, sur le terrain de sciences bien différentes en apparence. Cherchez, je suppose, à discuter attentivement le mode de propogation de la lumière ; bientôt vous êtes conduit à comparer ce mode à celui des autres impondérables ; à chercher les points de ressemblance et de dissemblance de ces agents, leurs fonctions générales dans la nature. Nous les trouvons non-seulement dans ce que nous nommons la nature morte, mais encore dans les êtres vivants ; nous reconnaissons qu'ils y sont indispensables, et nous demandons le rôle qu'ils jouent dans ce phénomène mystérieux qui s'appelle la vie ; nous appelons à notre secours des sciences qui ne paraissent s'occuper que des choses mortes.

Dans cette marche ascendante des sciences cependant, il apparaît de périodes en périodes, de ces conquêtes qui ont un caractère plus particulier de généralité, et qui nous poussent beaucoup plus impérieusement vers une *métaphysique expérimentale*.

Pour être concis, et pour indiquer de suite le sujet que je me propose d'envisager dans les pages suivantes, je ne ferai qu'une seule citation.

Il y a dix ou douze ans environ, le Dr Meyer, de Heilbronn, introduisit dans le langage de la physique une expression nouvelle : celle d'*équivalent mécanique de la chaleur*. Au premier abord, ce terme ne semble concerner qu'un certain ordre de phénomènes très-restreint ; il semble ne s'appliquer qu'à cette partie de la physique pure qui s'occupe des propriétés du calorique. Voyons cependant s'il s'agit en effet d'une question si bornée.

Nos machines à vapeur nous aident à soulever des fardeaux, à vaincre des frottements, à produire des chocs de tous genres : et c'est là précisément ce qui constitue leur travail mécanique. Mais

ce travail s'obtient-il gratis? Non sans doute; pour le créer, il faut dépenser une certaine somme de calorique.

Le seul terme d'équivalent mécanique de la chaleur implique un rapport déterminé entre la dépense de calorique et le travail produit; l'expérience en effet confirme, en un sens du moins, l'existence d'un tel rapport. Mais qu'est-ce que le travail à proprement parler de nos machines? Nous disons qu'elles élèvent, par exemple, des fardeaux à une certaine hauteur, en un temps donné. C'est donc la *gravitation universelle* qui, en donnant au fardeau son poids effectif, produit ici la résistance à cette autre force que nous dépensons, et qui s'appelle *calorique*. L'expression du Dr Meyer établit donc forcément un rapport d'équilibre, d'*équivalence* entre deux puissances qui, pour nous, n'avaient aucun rapport, entre la chaleur et la pesanteur ou plutôt la cause de la pesanteur.

Supposons en effet que nous ayons élevé un poids d'environ 371k.m. à 1 mètre de hauteur; laissons ce poids glisser sur un plan incliné de telle sorte que le mouvement reste uniforme. Quelle est ici la force motrice? c'est le poids même du corps, et non plus la chaleur; la cause de la force motrice est la gravitation. Qu'est-ce qui détermine ici la résistance au mouvement? c'est le frottement du poids sur notre plan. Ce frottement produit du calorique; lorsque le poids sera descendu de 1m de hauteur, ce frottement aura produit une unité de chaleur. C'est précisément ce que, dans une machine à feu parfaite, il aurait fallu dépenser de chaleur pour élever à 1 mètre de hauteur notre fardeau de 371k.m. (1).

Mais la pesanteur des corps et la puissance expansive de la chaleur ne sont pas nos seules sources de force motrice. L'électricité, par exemple, peut aussi nous servir aujourd'hui d'agent moteur. Dans un moteur électrique, le travail mécanique produit est créé à l'aide d'une dépense de fluide électrique: si nous em-

(1) Pour plus de clarté j'ai supposé ici l'équivalent constant et égal à 371k.m. on sait maintenant sous quel rapport cette supposition pèche contre la stricte réalité des faits. (Voyez pages 196 et suiv.)

ployons un tel moteur à surmonter des frottements ou à élever des fardeaux, il se produira du calorique dans le premier cas, et la quantité produite sera *équivalente*, mécaniquement, à la dépense d'électricité ; dans le second cas, c'est encore la gravitation qui détermine la résistance au mouvement : entre la dépense d'électricité et la somme des résistances opposées par la pesanteur, il y a encore un rapport d'équivalence. L'expression du Dr Meyer nous contraint donc déjà à nous occuper de trois forces qui pour nous n'avaient aucun point de communauté ; et comme nous pourrions étendre le même raisonnement à toutes les sources connues de force, elle concerne donc à la fois la physique et la dynamique toutes entières.

Mais l'animal, l'homme, qui gravissent une montagne par exemple, travaillent *mécaniquement* aussi, car ils surmontent l'action de la pesanteur pour élever leur propre poids à une certaine hauteur en un temps donné. Ce travail s'obtient-il gratis? Eh! non. Il disparait dans le moteur animé une somme de chaleur qui est à chaque instant proportionnée à la somme de résistance surmontée. Pourtant cette admirable mécanique dont dispose la vie n'est point une machine à calorique. Ce n'est point la chaleur qui, rayonnant du cerveau sous l'impulsion de la volonté, va déterminer la contraction des muscles de nos membres. La chaleur est donc dans le corps vivant en rapport d'équivalence avec une autre force, quelle qu'elle soit pour le moment ; et cette force elle-même est en rapport d'équivalence avec la gravitation universelle.

Cette expression d'*équivalent mécanique de la chaleur* nous élève rapidement et logiquement, comme on voit, d'une simple question de physique à un vaste ensemble de questions, où l'être vivant lui-même ne figure plus en quelque sorte que comme un détail naturel.

Je m'arrête ici dans cette *introduction motivée* au sujet que je me propose d'embrasser; et au lieu de donner premièrement un programme ambitieux des matières traitées, j'aborde ce sujet, avec la certitude que personne ne s'étonnera de la diversité des parties examinées.

PREMIÈRE DIVISION.

Pendant bien longtemps les physiciens ont cherché à assimiler le calorique à un fluide matériel universellement répandu, tendant, en vertu d'une répulsion propre à ses parties, à se mettre partout en équilibre, existant dans le vide et dans l'intérieur des corps dont il tend à écarter, et dont il écarte en effet les molécules chaque fois que, par le fait d'une cause quelconque, l'équilibre calorifique vient à être rompu. Selon cette doctrine (qui s'appliquait avec les modifications convenables à la lumière, à l'électricité...), le calorique serait non seulement indestructible (ce que l'on est bien obligé d'admettre en toute hypothèse), mais encore intransformable et incapable de se manifester autrement que comme chaleur. Le calorique qui se développe ou se dégage pendant les phénomènes chimiques, pendant la compression des corps, notamment des gaz, pendant le frottement, etc., serait dû, à ce point de vue, uniquement à un rapprochement plus grand entre les molécules corporelles; rapprochement qui exprime d'entre leurs interstices une partie du fluide qui s'y trouvait. Cette doctrine, ainsi d'ailleurs que ses congénères, étendue aux autres principes impondérables, a toujours été défectueuse, il faut bien le dire. En dépit du génie et des efforts de quelques-uns des physiciens qui l'ont soutenue, et qui en ont tiré tout ce qu'il est possible d'en tirer, elle n'a jamais pu expliquer tous les phénomènes déjà connus.

Aujourd'hui elle est en réalité devenue tout-à-fait insoutenable, du moins sous son ancienne forme. En effet, d'une part, en ce qui concerne les manifestations du calorique en dehors des corps, la théorie du rayonnement, forcément adjointe à cette doctrine, ne suffit plus pour expliquer quelques-uns des phénomènes les plus élémentaires. Et, d'autre part, en ce qui concerne la production du calorique dans les corps, on citerait aujourd'hui des milliers de cas, où ni l'usure de la matière des corps, ni les rapprochements ou écartements de leurs molécules, ni leurs changements de capa-

cité, ne peuvent plus être invoqués pour expliquer la production ou la disparition du calorique. Parmi tous ces phénomènes, je n'en citerai que deux qui tranchent d'une manière radicale.

1° Une masse métallique que l'on fait tourner vivement sur elle-même entre les pôles opposés d'un aimant énergique, s'échauffe ; en même temps elle éprouve une résistance continue dans son mouvement qui s'arrêterait bientôt, si l'on ne dépensait sans cesse de la force pour l'entretenir. Cette expérience pouvant se faire dans le vide le plus parfait, ce n'est à aucun frottement matériel qu'est due la chaleur développée. Or, il arrive que la quantité de calorique produite est proportionnelle à la quantité de force motrice dépensée, c'est-à-dire au travail mécanique exécuté. Tout le monde connaît cette belle expérience toute récente de M. Foucault.

2° Si nous mesurons la quantité de calorique qu'il faut pour réduire en vapeur, à une pression constante, un poids donné d'eau, et si nous mesurons la quantité que nous rend cette vapeur lorsque nous la condensons, il se montrera deux résultats singulièrement distincts : 1° les quantités dépensées et retrouvées seront parfaitement égales lorsque la pression de la vapeur ne variera pas avant la condensation ; 2° elles sont au contraire très-inégales, lorsque le volume de vapeur d'abord produit aura pu s'accroître et diminuer de pression par un accroissement de l'espace limité où il se trouvait compris. La quantité retrouvée sera d'autant plus faible que l'augmentation de volume aura été plus considérable.

Si nous remarquons que, dans la première expérience, il n'y a eu aucune modification dans l'état des molécules des corps pendant toute la durée des phénomènes, et si nous remarquons que, dans la seconde expérience, la modification n'est que temporaire, parce que le calorique dépensé et retrouvé est mesuré dans le même corps, on sera forcé de dire : 1° que le calorique peut être créé et détruit, tout au moins en apparence ; 2° et que l'altération de l'état interne du corps n'est pas une condition *sine quâ non* de ce double phénomène.

Mais l'esprit humain (gage heureux qui lui a été donné de sa

propre conservation), l'esprit humain n'admet et ne saurait admettre que ce qui *est* comme substance puisse cesser de l'être jamais. Comme il était impossible d'admettre que le calorique, l'électricité, la lumière, puissent être réellement produits ou détruits, on a supposé que ces agents pourraient bien n'être que les manifestations des substances, et non les substances elles-mêmes.

On admet donc l'existence universelle d'un ou de plusieurs éthers, au sein desquels s'accompliraient des mouvements qui nous manifesteraient ces principes comme calorique, lumière, électricité. En ce qui concerne les phénomènes connus d'abord sous le nom de rayonnement de la lumière, rayonnement du calorique, soit dans le vide, soit dans les corps diaphanes ou diathermanes, cette doctrine rend admirablement compte des faits, et non seulement elle a expliqué tous les faits déjà connus, mais entre les mains de Fresnel et de Young, elle a servi à prévoir des phénomènes que l'expérimentation n'avait pas encore su mettre au jour.

La doctrine précédente, convenablement modifiée, développée, et en quelque sorte agrandie, est probablement l'expression de la vérité, ou du moins elle peut rendre compte de tous les faits connus et les faire concevoir. Mais par plusieurs raisons capitales, que j'indiquerai bientôt, elle a été dans ces derniers temps déviée complètement de sa direction logique, et, il faut le dire hardiment, elle a été complètement faussée. Elle a pris, peut-être à l'insu même de beaucoup d'esprits qui l'acceptent en entier, un sens et un caractère bien plus étendu, et l'on peut dire qu'elle fait corps avec l'une des trois doctrines essentielles par lesquelles l'homme, depuis l'origine de la philosophie, s'efforce d'interpréter les phénomènes de l'Univers.

L'hypothèse d'éthers partout répandus, doués d'une élasticité et d'une ténuité parfaites, rend bien compte du phénomène de rayonnement calorifique et luminique, elle rend compte de tout ce qui concerne les manifestations libres de ces principes en eux-mêmes ; il n'est besoin par exemple de supposer aucune activité propre à l'éther calorifique, pour concevoir comment le calorique, sous forme libre, traverse l'espace et les corps diathermanes qui s'y trouvent. Mais cette hypothèse employée telle quelle, n'explique

qu'un ordre de phénomènes, et peut-être le plus limité. Elle devient déjà presque insuffisante pour expliquer les manifestations libres de l'électricité; et pour la rendre acceptable, il faut ici poser l'hypothèse subsidiaire d'un état de polarité dans l'éther électrique. Mais le calorique absorbé par les corps, l'électricité, la lumière même, agissent à tous moments comme de vraies FORCES, c'est-à-dire se montrent capables de déranger l'équilibre interne ou externe des corps, de le rétablir quand il est dérangé, de tirer en un mot la matière inerte du repos ou de l'y faire rentrer. Le volume d'un corps dépend sans cesse de son état thermal actuel : cet état vient-il à être modifié, le volume augmente ou diminue; l'affinité chimique dépend directement, et peut-être uniquement, de l'état électrique des éléments constitutifs des corps; l'électricité libre, à l'état statique ou dynamique, se manifeste à distance infinie comme puissance attractive ou répulsive; la lumière elle-même est capable (indirectement si l'on veut) de rompre l'équilibre des parties matérielles des corps et de provoquer, par exemple, des combinaisons ou des décompositions chimiques.

L'hypothèse des éthers se trouve ici en face d'un dilemme auquel on tenterait vainement d'échapper. Ou l'éther est dénué d'inertie et de pondérabilité, et alors ce n'est plus par des mouvemens seuls qu'on peut expliquer les manifestations du calorique, par exemple, comme force, car les vibrations d'une substance dénuée d'inertie ne pourraient ni se communiquer à la matière inerte, ni écarter entre elles les molécules de cette matière; ou l'éther est doué d'inertie et devient tout semblable à la matière elle-même, et alors il faut expliquer comment la matière peut se tirer du repos et s'y faire rentrer sans la présence d'une force proprement dite.

Bien que le premier terme, convenablement posé et défini, soit le seul en harmonie complète avec l'ensemble des faits, et satisfasse aussi le plus la pensée, c'est pourtant vers le second terme que penchent en quelque sorte fatalement aujourd'hui la plupart des esprits.

Le calorique, la lumière, l'électricité, dit-on généralement, ne sont que des modes particuliers de mouvements de la matière elle-

même des corps, et nullement, comme on l'a admis si longtemps, des agents, des principes à part.

Le calorique rayonnant qui échauffe un corps ne fait que lui communiquer ses propres vibrations, et ce sont elles qui alors augmentent le volume apparent des corps. Il en est ainsi, sous d'autres formes propres, de l'électricité.

Lorsqu'un corps se dilate, lorsqu'un gaz, lorsque la vapeur par exemple se détend et met ainsi en mouvement les pistons d'une de nos machines, il n'y a qu'une transformation d'un mouvement en un autre: le mouvement vibratoire, que nous nommons calorique, se transforme en un mouvement de translation, et nous donne ce que nous nommons travail, ou somme de force motrice.

Il n'est pas étonnant donc que le calorique *disparaisse*, puisque le mouvement, qui seul le constituait, s'est changé en un autre mouvement tout différent, mais équivalent.

Il n'est pas étonnant que le calorique puisse être représenté par un *équivalent mécanique;* il n'y a plus seulement ici représentation, il y a identité. Car le travail exécuté par notre piston n'est autre chose que la somme des forces vives que représentaient tous les mouvements vibratoires internes de la vapeur ou du calorique. Il n'est pas étonnant que l'électricité, et tous ses effets, puissent être représentés par un *équivalent mécanique*, et par un *équivalent calorifique* aussi; car toutes les manifestations de ce qu'on a appelé jusqu'ici les impondérables ne sont que des conséquences et des extensions du principe général de la *conservation des Forces vives.*

Mais ce qui s'applique aux principes prétendus impondérables, doit s'étendre à toutes les forces en général. Si ces vibrations matérielles peuvent expliquer comment la chaleur repousse les molécules des corps entre elles, ou plutôt augmente leurs intervalles, si elles peuvent expliquer comment un corps électrisé en attire ou en repousse un autre à distance indéfinie, elles doivent aussi suffire pour interpréter les phénomènes élémentaires de la pensanteur des corps. La gravité alors n'est plus et ne peut plus être un principe externe à la matière, et agissant comme principe de mouvement

relatif à deux corps séparés ; et deux sphères qui s'attirent à des milliards de lieues de distance doivent aussi le faire en vertu d'un mode de mouvement quelconque dans le milieu qui remplit l'espace de séparation. Ici la conséquence est forcée : un corps qui tombe dans le vide d'une hauteur d'environ 371$^{m.}$ et dont le mouvement est tout d'un coup tué par un choc, s'échauffe, et s'il pèse un kilog, son échauffement représente 1 calorie ; et de même que 371$^{k.m.}$ de travail équivalent à une calorie, une calorie équivaut aussi à l'action de la pesanteur exercée sur notre corps pendant 371$^{m.}$ de chute. La gravité, l'attraction, et la répulsion en général, de quelque mode qu'elles s'exercent, sont ainsi en quelque sorte matérialisées par une conséquence logique. Et si du monde physique nous passons aux phénomènes de la vie organique, nous arrivons forcément aux mêmes déductions. Ainsi, le calorique n'étant qu'un état vibratoire de la matière, la chaleur vitale développée dans l'animal n'est plus que qu'une impulsion particulière que donnent aux molécules les combinaisons que vient former l'oxigène absorbé par l'acte respiratoire. Mais puisqu'une partie notable de calorique disparaît, ou plutôt cesse de se développer lorsque l'animal se meut et travaille, lorsque ses muscles se contractent par l'acte répété de la volonté, il s'ensuit que la vibration calorifique est remplacée par un autre mouvement, que nous appelons d'abord vibration nerveuse, laquelle se transforme elle-même en vibration musculaire, et enfin en travail externe. Mais ce que l'on a longtemps nommé fluide nerveux, n'est autre chose qu'un mouvement vibratoire particulier des conducteurs et des centres qui constituent l'ensemble du système nerveux, qui est l'instrument indispensable de toutes nos perceptions, de tous nos actes physiques et intellectuels, de toutes les manifestations de notre vie. Pourquoi et comment la volonté serait-elle autre chose, elle-même, qu'un nouveau mode vibratoire ? — Je m'arrête ici. La doctrine que je viens d'exposer n'est au fond qu'une substitution d'un échange perpétuel de mouvement à la notion première de force ; mais tout s'y enchaîne logiquement. Admettez un point de départ ; admettez que le calorique, ou n'importe lequel des agens de mouvement, n'agisse qu'en vertu d'un mouvement qui lui est *propre*, et non en vertu d'une *activité particulière*, et vous abolissez toutes les autres forces de la nature, et vous arrivez,

de conséquence en conséquence, à faire de l'âme humaine elle-même une simple manifestation, un mouvement spécial de la matière. Une fois un point de départ admis, une fois que l'on fait abstraction surtout de certains faits tout-à-fait impérieux, le matérialisme devient la plus logique et la plus impitoyable des doctrines. Si quelque chose le démontre, c'est qu'un poëte latin (1) a pu, il y a 1900 ans, développer ses conséquences avec une netteté et une précision qui peuvent surprendre un physicien de notre siècle, armé de tous les faits conquis si péniblement par la science expérimentale.

Je le répète, en se résignant à oublier, pour le besoin d'un système, un certain nombre des faits les plus importants et les plus péniblement conquis par l'expérience, et en partant de ce point que le calorique, par exemple, pourrait n'être qu'un mode de vibrations matérielles, on arrive rapidement et forcément à étendre la même interprétation à tous les autres principes qui semblent commander la matière. Et il n'y a qu'une sorte d'arrêt volontaire dans le raisonnement qui puisse nous empêcher d'expliquer aussi l'âme humaine.

DIGRESSION PHILOSOPHIQUE.

Avant de chercher si nous pouvons admettre un tel point de départ, et si nous pouvons oublier même temporairement les faits, il me semble utile de chercher par quelles voies, par quelles tendances, notre être pensant est arrivé scientifiquement à une doctrine qui n'est au fond que la négation de cet être. Ce travail préliminaire est des plus simples, et il nous évitera bien des détours et des efforts pour atteindre ensuite le but.

Origine du panthéisme.

On l'a dit maintes fois, et toujours avec justesse, l'homme est un être de sentiment et d'imagination, et un être de raison; mais ce que l'on ne peut répéter assez, c'est qu'il est à la fois ces deux

(1) Lucrèce. *Poem. de nat. rerum.*

êtres ; ou bien plutôt, c'est qu'il est doué d'une double faculté que l'on peut bien scinder pour les besoins d'une analyse psychologique, mais que dans la réalité de notre existence nous ne saurions dédoubler complètement, et surtout impunément. C'est la raison qui introduit l'ordre, l'harmonie, la dépendance des parties dans une œuvre d'art ; l'artiste qui malheureusement pour lui saurait se dépouiller de toute sa raison, ne créerait que les fantaisies vagabondes d'un fou. Le philosophe, le savant, qui aussi saurait se dépouiller de sa puissance de sentir et d'imaginer, ne serait plus qu'un froid et aride nomenclateur. D'ailleurs, si nous pouvons temporairement user d'une seule de nos facultés intellectuelles, le besoin de les exercer toutes est toujours là ; tel qui sourit avec un certain dédain aux créations puériles, selon lui, de l'artiste, introduit ou crée souvent dans la réalité où il vit des rêves dont rougirait le poëte le plus libre.

Placé en face de la nature, et mis en rapport avec ses œuvres, l'homme exerce sans cesse sa double faculté : sentir et créer, et puis raisonner. Il cherche à remonter des effets aux causes, il s'efforce de trouver l'unité là où tout lui semble d'abord diversité ; il analyse, il interprète, il dissèque, mais en même temps il recompose et il crée. Quand les faits lui manquent, et tant qu'ils lui manquent pour remonter à la vérité par la raison appuyée sur l'expérience, il imagine, il crée et substitue ses propres créations, vraies ou fausses, aux réalités du monde qui l'entourent. Parmi les hommes pris collectivement, les préjugés, les superstitions de tout genre qui, comme le dit si noblement Hans Œrsted, ne sont que les fruits incultes et primitifs de nos aspirations vers la vérité, règnent en maîtres souverains, et souvent cruels, bien avant que la raison secondée par l'expérience ait pu soulever péniblement un des coins du voile qui nous cache cette vérité. Pour les intelligences plus rares, qui de tout temps ont médité et interprété l'univers, les doctrines, les théories, les systèmes les plus opposés sont nées bien avant qu'il se trouvât un seul fait pour les justifier ou les réfuter.

Ce qui nous frappe le plus dans une contemplation même superficielle de la nature, c'est la simplicité des moyens qu'elle emploie en général pour atteindre un but, et sa persévérance à employer

le même moyen, à l'user en quelque sorte, jusqu'à ce qu'un autre devienne indispensable.

Ce caractère si saillant a de tout temps préocupé les philosophes : loin d'être devenu contestable par suite des progrès de nos sciences d'observation, il a au contraire reçu une confirmation nouvelle, dans de certaines limites du moins, qu'il s'agit précisément de faire ressortir. Ainsi, pour ne prendre qu'un exemple : dans les êtres organisés, la nature, à l'aide d'un très-petit nombre d'éléments chimiques qu'elle a mis au service de la vie, a su se revêtir de la variété la plus prodigieuse dans les formes générales comme dans les détails constitutifs de ces êtres.

Ce caractère si admirable, qui est en harmonie si complète avec nos propres aspirations, est, par cette raison même, singulièrement exagéré en bien des cas. Je ne ferai ressortir la vérité de cette assertion qu'à un seul point de vue conforme à mon sujet. Les mouvements de tous genres, les variations, les modifications, les altérations infinies que nous apercevons dans ce qui nous entoure et en nous-mêmes, font naître en nous presque instinctivement la notion générale de la force. — D'abord vague et indéfinie, cette notion se débrouille et se consolide de plus en plus, à mesure que nos perceptions presque instinctives se transforment peu à peu en observations méthodiques guidées et réglées par la raison. — On a compris, dès l'origine, qu'une force quelconque ne peut se manifester que par l'attraction et la répulsion des parties qui se meuvent, qui varient, qui s'altèrent. — Et le désir de simplifier a fait admettre qu'il pourrait bien n'exister qu'une seule et unique force universelle pénétrant tous les êtres. De nos jours, cette idée est accueillie par les esprits les plus éminents, avec une sorte de préférence et d'affection. Les progrès de la physique nous ont révélé une telle analogie entre les divers principes se manifestant comme force, entre le calorique, l'électricité, etc., que l'on a conclu que la gravité, le calorique, que toutes les forces en un mot ne sont que les manifestations diverses d'un même principe général. Vraie ou fausse, cette idée est éminemment logique, et elle recevra tôt ou tard, des données de l'expérience, une confirmation ou une réfutation radicale. —

Cette doctrine, sinon juste du moins très-rationnelle, a suivi les diverses phases du progrès de l'ensemble des sciences naturelles ; elle s'est en quelque sorte éclaircie et débrouillée comme les principes eux-mêmes sur lesquels elle s'exerce. Mais, de tous les temps, elle a été la congénère, je dirais presque la sœur, d'une autre doctrine beaucoup plus étendue, beaucoup plus tranchante.

L'hypothèse d'une seule force ne suffisait pas encore à notre désir de simplifier. Les corps évidemment ne se meuvent, leurs parties ne se joignent ou ne se disjoignent que sous l'empire d'une attraction ou d'une répulsion réciproques. De quelque manière qu'on explique d'ailleurs celles-ci, les corps évidemment n'existent comme tels qu'en vertu d'une ou de plusieurs forces qui les pénètrent. On a promptement étendu *à la matière elle-même*, pondérable et inerte des corps, ce qui ne peut être vrai que pour ceux-ci dans leurs formes, et l'on a admis que la matière n'existe qu'en vertu d'une force.

Le panthéisme, que je viens de définir sous sa forme la plus générale, a sans doute d'autres origines que celle que je lui assigne ; il a régné et règne encore comme doctrine religieuse dans des sociétés où ni les sciences en général, ni l'esprit d'analyse n'étaient assez avancés pour le développer sous cette forme particulière. On ne saurait contester pourtant que chez les philosophes anciens ou modernes qui l'ont posé comme vérité, il ne soit né dans l'un des plus nobles penchants de l'esprit humain, dans le désir d'atteindre dans la nature l'unité finale.

Origine du matérialisme.

Il m'eût suffi de modifier et de déplacer quelques-uns des termes des considérations précédentes, pour montrer que le même désir d'arriver à l'unité a conduit quelques penseurs au matérialisme le plus exclusif. Mais ce point de vue ne serait pas complet ; il importe en effet de montrer qu'il existe une raison secondaire, quoique très-importante, pour laquelle la notion de force a été abolie complétement et a fait place dans quelques esprits à l'hypothèse d'une *matière uni-*

que, capable, il est vrai, non de se mouvoir par elle-même, mais de recevoir le mouvement par communication.

Dans le cercle ordinaire de la vie de l'homme, le plus grand nombre des choses sur lesquelles il pense, sont délimitées et par suite *finies :* elles peuvent se représenter sous forme de figures, d'images. Tout ce qui est transmis par nos sens d'une manière distincte se trouve dans ce cas ; tout ce qui *peut* nous parvenir par leur intermédiaire, quand bien même nous le créerions en nous, se trouve encore dans ce cas. Nous nous servons sans doute bien souvent de termes qui impliquent autre chose que des formes et qui ne peuvent nullement se figurer : les mots justice, morale, bien, mal, etc., évidemment expriment des abstractions parfaitement indépendantes de toute délimitation. Mais à peine l'homme, en général du moins, les entend-il, qu'il se hâte de les appliquer, de les traduire en exemples, et de les dépouiller de leur aspect abstrait en les traduisant en faits précis ou représentatifs, en figures. — Ces mots, pour la plupart des personnes qui s'en servent, ne sont que les résumés collectifs des faits eux-mêmes, et aussi souvent qu'on les énonce, ils sont suivis de leur cortège de traductions, d'applications figuratives qui les éclaircissent à l'*imagination*. Dans nos sciences, il en est à peu près de même de tous les phénomènes (le mot le dit) ; tout ce qui peut s'observer peut aussi se figurer, et bien des mots qui au fond ne portent aucunement sur les idées représentatives, sont réduits par nous en applications et transformés ainsi en figures équivalentes. De ce fait général, sur lequel je crois inutile de m'arrêter d'avantage, tant il est patent, il résulte que la plupart des hommes cherchent constamment à tout *se figurer*, et ne conçoivent, ou du mois ne croient concevoir une chose, que quand ils l'ont ainsi délimitée, que quand en un mot ils se la figurent. Au point de vue philosophique, il est résulté de ce fait que beaucoup de grands esprits en sont venus à poser en principe que l'homme ne peut penser que par image, qu'il ne peut avoir aucune notion exacte autrement que sous forme figurative. Supposons vraie, pour un moment, cette délimitation de la pensée même, et voyons ce qui en résulterait.

Tous les phénomènes, disons-nous, peuvent se figurer, se peindre, se voir, qu'ils soient d'ailleurs ou non directement observables.

Dans l'espace infini, nous pouvons voir par l'imagination des systèmes solaires tellement éloignés que jamais le télescope ne sera assez puissant pour nous les révéler. Dans l'intérieur des corps, nous pouvons nous figurer, il est vrai, par l'imagination, le groupement et les mouvements d'atomes que jamais microscope ne sera assez puissant non plus pour nous révéler. Mais en est-il de même des causes, quelles qu'elles soient d'ailleurs, qui produisent les phénomènes? En est-il de même de l'essence, du substratum, de la SUBSTANCE qui accomplit le phénomène? Nous voyons par les yeux de l'imagination le déplacement de deux corps qui se meuvent relativement : en est-il de même de l'essence du mouvement? Que dis-je, voyons-nous par nos yeux l'acte d'un seul corps qui se meut? A ces seules questions, les yeux si clairvoyants de notre imagination, souvent si indomptable, sont frappés d'amaurose. Si l'homme ne peut penser que par image, si l'homme n'a que la notion du fini, il faut bon gré mal gré qu'il dépose son orgueil et qu'il renonce à comprendre quoi que ce soit à l'essence des choses, à remonter aux causes; et le rapport des causes aux effets, les lois des phénomènes qui sont nécessairement antérieures aux phénomènes, ne peuvent plus être pour lui que des formes postérieures aux phénomènes.

Mais l'orgueil humain ne recule pas aisément (et nous pensons qu'il a parfaitement raison d'ailleurs); contrairement au roseau de la fable, il rompt, mais ne plie pas. L'école philosophique, qui en était venue à dire que l'homme ne pense que par des images, a trouvé beaucoup plus simple de nier tout ce qui dans la nature n'est pas image, que d'admettre qu'il y eût quelque chose que l'homme ne puisse pas concevoir. Le vide, l'espace, le temps, a-t-on dit, sont des mots vides de sens. Le mouvement, a-t-on dit, est tout relatif; un corps unique dans l'univers ne pourrait se mouvoir. La force, a-t-on dit, est une entité purement métaphysique. Entre deux sphères qui s'attirent *gravifiquement* à travers l'espace, il y a évidemment *quelque chose* qui établit le rapport des deux sphères; mais comme il est impossible de peindre, par une image, l'activité de la substance, on a trouvé très-simple de nier cette activité et de remplir l'espace de matière en mouvement. Entre deux atomes qui s'attirent ou se repoussent, il y a évidemment aussi quelque

chose, mais l'activité du *quelque chose* ne pouvait encore être *imaginée;* on y a substitué d'autres atomes en mouvement. Mais alors à quoi bon inventer deux genres d'atomes? Ceci encore ne pouvait se figurer. Et l'on a dit que le calorique, l'électricité, la lumière, ne sont que des mouvements de la matière elle-même. Après être parti d'une hypothèse aussi précise sur les fonctions de la pensée pour nier tout ce qui n'est ni fini ni limité, on est revenu au point de départ lui-même; et comme il est encore infiniment plus difficile de représenter l'activité de la pensée, de quelque imagination que l'on soit doué, on a aboli d'un trait de plume cette activité pour y substituer de simples vibrations de la matière cérébrale.

Différences qui caractérisent le développement du panthéisme et celui du matérialisme.

Je ferai remarquer, en passant, la singulière différence qu'il y a entre le développement nécessaire de deux doctrines si semblables dans une de leurs affirmations et si opposées dans l'autre. Le panthéisme veut que tout soit force et dérive de la force; le matérialisme veut que tout soit matière en repos ou en mouvement. Le premier n'a pu naître qu'en nous et aller du dedans au dehors: il est né du sentiment intime de l'unité de notre être pensant et de son activité, que nous avons ensuite généralisées et étendues à toutes choses. Le second n'a pu naître qu'en dehors de nous par suite d'une incapacité réelle ou supposée de nos facultés, et puis il est rentré en nous pour détruire ce qu'il ne pouvait plus expliquer. Il est clair que celui qui, par une raison ou une autre, commencerait par nier l'âme et chercher la pensée dans des vibrations cérébrales, n'aurait plus nul droit de sortir de lui-même pour aller nier l'activité des forces; car les vibrations ou les mouvements de la matière cérébrale sont limitées, finies et définies, et l'on aura ici beau se payer de mots, il n'en demeurera pas moins manifeste que l'être qui serait réellement fini, ne pourra jamais avoir la notion que de ce qui est fini.

Que la force existe ou non, nous n'avons plus le droit de la

constater ou de la nier dès que nous nous refusons à nous-mêmes une activité spécifique pour y substituer la simple image d'un mouvement multiple de molécules.

Mais est-il vrai que notre pensée ne puisse réellement s'exercer que sur des choses finies et soit essentiellement finie elle-même? Ici je puis me permettre d'être bref et tranchant : ce serait mettre sans cesse en question les vérités les mieux acquises que de m'arrêter longtemps sur une pareille question.

Réfutation de l'une des assertions fondamentales du matérialisme.

Oui sans doute, une multitude des objets sur lesquels nous pensons ont une forme, une figure, et sont par suite finis : mais il n'en est pas ainsi pour tous. On a longtemps essayé de bannir l'infini des mathématiques, et notamment du calcul différentiel : aujourd'hui nous pouvons regarder comme admis par les esprits sensés que le vaste et solide édifice des mathématiques pures et appliquées s'écroulerait, si l'homme n'avait pas la notion de l'infini aussi bien que celle du fini. Que dis-je? Les images finies sur lesquelles nous opérons, entraînent à la fois, pour notre esprit et pour nos sens, la notion de l'indéfini. Le cercle, le triangle que je vois en réalité, ou par la pensée, est certes fini; mais pourquoi le vois-je, c'est parce que, précisément par la nature définie de sa forme, il tranche sur le milieu qui l'entoure, et qui, pour l'organe visuel tout aussi bien que pour la pensée, acquiert dès lors le caractère essentiel et nécessaire de l'indéfini. Et si, des objets sur lesquels nous pensons, nous passons à la pensée elle-même, serons-nous plus dans le doute sur sa nature? Le triangle, le cercle dont j'assigne les propriétés, est par ce fait même parfaitement autre que notre propre substance : par ce fait même que je sais les connaître, les comprendre, je les entoure, je les enveloppe en quelque sorte par la puissance et l'activité qui m'est propre. Des choses finies sont ici le sujet sur lequel s'exerce la puissance et l'activité, mais non cette puissance elle-même comme forme, s'il peut être question ici de forme; la substance pensante de notre être est donc au moins indéfinie. Et comme en mathématique (ainsi d'ailleurs que pour mille et

mille sujets) l'activité et la puissance de l'être intellectuel savent non seulement concevoir, mais encore employer en quelque sorte l'infini comme leur instrument d'investigation, il s'ensuit que l'activité pensante est au moins à la hauteur du sujet sur lequel elle manifeste sa puissance et ne peut, sans une absurdité par trop flagrante, être confondue avec les choses finies et définies. Le panthéisme se développe en nous par suite d'une surabondance de puissance, par une généreuse expansion de notre propre activité. Placés au sommet de l'échelle des êtres pensants, animés à un plus haut titre qu'eux tous, nous cherchons à animer et à vivifier tout ce qui nous entoure. Le matérialisme se développe en nous par suite d'une méprise sur notre propre manière d'exercer notre pensée, par suite d'un abaissement exagéré de notre puissance. Ce que le panthéisme exagère en plus et noie, pour ainsi dire, dans la plénitude de la vie, le matérialisme l'exagère en moins, et le détruit dans son essence. Mais ces doctrines, toutes deux, dérivent évidemment d'un des plus nobles besoins de l'être pensant, de celui de chercher sa propre unité dans l'ensemble du monde externe, besoin satisfait, il est vrai, d'une manière désordonnée, et sinon déraisonnée, du moins en dehors des lois de la saine raison. L'unité de l'art et l'unité arithmétique ne peuvent être confondues sans déraison. L'unité d'une de nos œuvres d'art finies, et l'unité de cette œuvre infinie et admirable qu'on appelle l'Univers, résultent de l'harmonie dans la diversité des parties, et non de l'identification de ces parties. Chercher l'unité de la nature dans l'identification des substances qu'elle met en œuvre, c'est à peu près soutenir qu'un tableau ne saurait être *un*, qu'à la condition d'être peint avec une même couleur.

Cette déviation exagérée et fausse du principe de l'unité n'a pas même pour elle l'avantage de nous conduire à quelque chose de clair et de satisfaisant pour la raison. Lorsque, par la pensée, nous avons réduit toutes les substances, en apparence diverses, à une seule et unique, nous sommes bien obligés, en face de la diversité des phénomènes qui est une *réalité*, de recourir à des causes qui déterminent la diversité. Et ces causes n'ayant plus alors la réalité de la substance, deviennent forcément des entités métaphysiques, des êtres fictifs et imaginaires.

La question de l'identité ou de la diversité des substances qui forment l'univers est une question de faits, et ne dépend pas de nous. Dieu soit loué, il ne dépend pas de nous qu'il existe réellement des forces et des principes inertes et des principes pensants, ou qu'il n'existe qu'une seule et unique force, ou qu'il n'existe qu'une seule et unique matière capable seulement de mouvement et douée seulement de propriétés. Ces principes sont ou ne sont pas; ils rentrent donc essentiellement dans l'ordre des faits positifs en dehors desquels il est impossible, en tout cas, de trouver la vérification. Depuis quatre mille ans tous les arguments indépendants de l'expérience ont été produits, et la question n'a pas fait un pas. L'étude directe des faits et des phénomènes sera-t-elle plus heureuse? C'est ce qu'il est permis d'affirmer, pour peu qu'on ait foi en la raison et en ses progrès. Et ce que l'on doit affirmer hardiment, c'est que tout ce que l'on essayera à l'avenir de fonder en dehors des faits, et sans avoir égard à leur ensemble, ne mérite plus d'être considéré comme raisonnable.

Cherchons aujourd'hui déjà ce qu'il est possible de tirer des données les plus positives des sciences d'observation : voyons si par hasard elles ne renferment pas les germes très-développés d'une métaphysique expérimentale. Et pour cela, suivons la méthode qui nous est, pour ainsi dire, conseillée par les considérations précédentes : aller des faits particuliers à l'ensemble des faits, et de cet ensemble à une généralisation inductive. Plaçons-nous dans un coin bien obsur, bien spécial, bien abstrait de la physique ; discutons les propriétés du calorique. — Arrachés bientôt de ce point isolé par la force des choses, et entraînés dans une course ascendante des plus rapides par cette conception si féconde d'un équivalent mécanique de la chaleur, peut-être serons-nous étonnés nous-mêmes du nombre de fruits déjà mûrs que nous trouverons sur notre route et ne regretterons-nous plus l'âpreté inévitable des premiers sentiers.

INDUCTIONS MÉTAPHYSIQUES QUI DÉCOULENT DE L'ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DU CALORIQUE.

Le calorique nous apparaît sous quatre points de vue essentiels :

1° Propagation dans les espaces stellaires, et dans ce que nous appelons le vide pneumatique ;

2° Propagation à travers les corps diathermanes et dans les corps non diathermanes (rayonnement et conductibilité) ;

3° Puissance d'expansion, état dans les corps ;

4° Rapports avec les autres manifestations : lumière, électricité, etc., etc.

Toute théorie qui ne rendrait pas compte des phénomènes du calorique sous ces quatre points de vue, à la fois, doit être réputée fausse.

1° Propagation du calorique dans les espaces stellaires.

Le calorique, de même que la lumière, se propage à travers les espaces stellaires : la discussion qui a si longtemps régné sur leur mode de propagation peut être regardée aujourd'hui comme close. Les expériences de M. Fizeau ont mis hors de doute que la théorie de l'émission ne peut plus être regardée comme acceptable pour la lumière; et comme il est certain que le mode de propagation du calorique n'est pas autre chose que celui de la lumière, la théorie des ondulations, la seule interprétation figurative que l'esprit humain ait pu mettre en opposition avec l'autre théorie, peut être admise définitivement.

Les espaces stellaires sont donc remplis d'un *principe susceptible de vibrer.*

Ce principe est-il de la matière ? Oui, s'il est inerte et pesant. Non, s'il est dénué de ces deux attributs.

Est-il inerte ?

Sa présence alors doit s'opposer au mouvement de tous les corps qui circulent dans les espaces célestes, ou, ce qui revient parfaitement au même, ses parties limitées par ces corps doivent sans cesse leur enlever du mouvement par suite d'un partage. Dans cette hypothèse, nos planètes sans cesse retardées devraient sans cesse se rappro-

cher du soleil et finir par y tomber au bout d'une période, si longue qu'on voudra d'ailleurs, de siècles. L'époque ne dépend plus ici que de la densité du milieu : à moins de supposer cette densité nulle, elle ne saurait être reculée à l'infini. L'astronomie répond ici péremptoirement que depuis que l'homme observe, il ne s'est opéré, dans le mouvement de la terre et de la lune, aucune modification qui puisse être légitimement attribuée à une résistance de l'éther. Mais les planètes, dit-on, ont une masse trop énorme pour que nous ayons le droit de conclure d'après le peu de temps que l'homme sait observer ; ce ne sont que les comètes qui puissent nous servir d'épreuve, et l'on cite alors la comète d'Enck qui semble, à chacune de ses révolutions, se rapprocher de l'astre central.

En ce qui concerne cette comète en particulier, les analystes les plus éminents n'ont point encore osé affirmer positivement que les modifications de son orbite sont dues à une résistance dans la marche de l'astre plutôt qu'à des perturbations encore à déterminer, que lui font subir les autres corps de notre système solaire. — Ne se peut-il pas d'ailleurs que l'atmosphère de cette comète, au périhélie, atteigne celle du soleil, et qu'il y ait ainsi un retard en quelque sorte accidentel ? Mais il faut s'occuper des comètes en général : elles sont en effet bien propres à nous donner une idée de ce que c'est que la prétendue résistance d'un éther. Leur masse est pour ainsi dire infiniment petite, et de plus occupe un volume colossal. — D'après Herschel, la matière qui compose quelques-unes, ne pèserait peut-être que quelques onces si nous la supposons réunie en corps à la surface de la terre. La masse n'est donc plus une objection à la persistance du mouvement des comètes en cas de résistance de l'éther. Et si l'on ajoute les considérations suivantes, cette résistance pourra être regardée comme réellement nulle. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer la queue lumineuse de beaucoup de ces astres étranges. Je n'en cite que deux des plus probables. D'après la plus ancienne et la plus admise, l'appendice lumineux serait dû à une émanation de la matière cométaire même. Dans cette supposition, si faible que soit la résistance de l'éther, la queue devrait toujours être en retard sur la marche du noyau : or il se trouve que, par une raison que l'on n'a pas encore su indiquer,

la queue est presque toujours dirigée suivant la ligne passant par le centre du soleil et par celui de la comète ; ce qui prouve que la vitesse angulaire est à peu près la même partout, et ce qui suppose une vitesse prodigieuse dans les parties extrêmes de l'appendice. — Eh ! bien, en dépit de cette vitesse, dont nous n'avons nulle idée, l'ensemble de la queue s'infléchit tout aussi souvent en avant qu'en arrière. L'autre hypothèse qui est due, je crois, à M. Saigey, attribue à la comète une atmosphère sphérique dont la queue de l'astre mesure le rayon : les rayons solaires, en traversant cette immense *lentille*, iraient se concentrer et se croiser sur une nappe paraboloïdale, nécessairement en opposition avec le soleil, et c'est en éclairant plus énergiquement l'atmosphère cométaire en cette partie qu'ils la rendraient visible. — Cette hypothèse explique très-bien la direction, la forme générale, la rapidité du mouvement de la queue. Sans nous permettre d'en apprécier le plus ou moins de mérite, nous ferons seulement remarquer que, si elle est vraie, une résistance quelconque de l'éther devrait troubler la forme sphérique de la comète et de son immense atmosphère, et altérerait encore plus la forme et la direction de la queue qu'il n'en arrive dans l'hypothèse première. Quoiqu'il en soit, il est difficile d'imaginer une hypothèse où les phénomènes que présente l'appendice lumineux de la comète puissent se concilier avec une résistance quelconque de l'éther, ou plutôt, et d'une manière beaucoup plus générale, avec l'idée d'une inertie dans les substances qui constituent le milieu stellaire. Et cette considération, si nous n'en avions nulle autre analogue, suffirait pour nous forcer à regarder ce milieu comme totalement dépourvu d'inertie.

L'éther calorifique est-il pesant?

S'il en est ainsi, cet éther doit augmenter de densité à l'entour de tous les corps qui circulent dans la firmament, exactement à la manière d'une atmosphère; et la direction des ondes calorifiques envoyées d'un corps à l'autre doit être modifiée par cette espèce d'immense lentille éthérée, absolument comme elle le serait par notre atmosphère terrestre. Mais ce que nous disons du calorique s'étend à la lumière. L'éther luminique, et pour parler d'une manière générale, tout *mi-*

lieu matériel qui remplirait l'espace, doit se concentrer à l'entour des corps célestes, des planètes, de la lune, etc., etc. Cependant la lumière solaire, la lumière des étoiles, lorsqu'elle passe près de nos planètes, n'est déviée que quand elle traverse la partie nettement terminée de l'atmosphère de celles qui sont douées d'une telle enveloppe gazeuse : elle ne l'est nullement, si près qu'elle passe du disque de la lune, par exemple.

Mais une considération beaucoup plus importante se présente ici :

Lorsque nous comparons seulement la substance des espaces stellaires à un gaz, nous sommes à l'instant forcés de l'y assimiler complètement et de l'identifier en tout point. L'une des propriétés les plus saillantes des gaz est de se mêler, de s'entre-pénétrer complètement, quelles que soient leurs densités, de manière à ce que leurs parties soient en quelque sorte prêtes à la combinaison chimique, si celle-ci est possible. Si donc le milieu stellaire est matériel et est seulement supposé analogue à nos gaz, il leur devient même identique : que dis-je ? il a forcément la même composition que notre atmosphère, et que toutes les atmosphères planétaires ou solaires. Que si, comme cela est en effet, notre atmosphère et celle des autres planètes est nettement tranchée et limitée, c'est qu'au-delà d'elles, il ne *peut plus exister de milieu matériel.*

Une substance, totalement différente de la matière qui forme les *corps*, remplit donc à l'infini cet espace sans bornes où des mondes sans nombre se meuvent en une paisible et inaltérable harmonie.

2° *Propagation du calorique à travers les corps.*

Passons-nous du mouvement du calorique (et de la lumière) dans les espaces célestes aux phénomènes qui se manifestent dans l'intérieur des corps, nous nous trouvons en face d'une question qui ne peut recevoir à la fois qu'une seule réponse sans aucune équivoque : Lorsque le calorique ou la lumière traversent un corps sous forme rayonnante, est-ce la matière du corps qui vibre et transmet l'ondulation calorifique ou luminique, ou est-ce un principe particulier, faisant, si l'on veut, partie constituante du corps, mais renfermé

en lui et distinct de la matière inerte et pondérable? — Si la substance qui vibre dans les espaces célestes et qui nous amène des astres les manifestations de calorique et de lumière, n'est pas douée d'inertie, elle ne peut communiquer son mouvement à ce qui est essentiellement inerte, et nous pourrons très-positivement affirmer, en partant de ce seul fait, que ce n'est pas la matière qui vibre dans un corps diathermane ou diaphane. Mais trop de preuves ici ne sauraient nuire.

Dans un milieu quelconque, les ondulations sont constituées essentiellement par un mouvement de va-et-vient des parties, qui s'exécute parallèlement à lui-même sur une certaine étendue, se communique de proche en proche sous forme de nappes, d'ondes contractées et dilatées. Dans un même milieu, les ondes peuvent différer entre elles par l'étendue de l'oscillation des parties vibrantes, par les vitesses de ces parties, par la distribution des périodes de vitesse, etc.; mais la vitesse générale de la propagation ne varie qu'avec les qualités mêmes du milieu. Dans l'air par exemple, il peut y avoir des ondes de toutes les longueurs possibles, depuis celles qui s'exercent de molécules à molécules, jusqu'à celles dont la longueur ne peut plus même se traduire en nombre fini. — C'est la longueur de l'onde qui constitue le degré d'accuité d'un son : au delà et en deça de certaines limites, notre oreille ne perçoit plus les sons. C'est la vitesse des vibrations qui dans une même onde détermine le degré de condensation et de dilatation, et par suite l'intensité du son. Mais la vitesse de propagation est la même en tous les cas. On pourrait déjà à la rigueur, en partant de la prodigieuse différence de vitesse des ondes sonores et des ondes calorifiques ou luminiques dans un même corps, conclure les différences du milieu qui vibre. En tout cas, on n'a jamais donné d'explication sérieuse de cette différence de vitesse dans l'hypothèse d'un même milieu. Ce n'est pas, en tout cas, la longueur absolue des ondes qui peut constituer la différence radicale. On dirait vainement que les ondulations calorifiques et luminiques n'ont lieu que de molécules à molécules, tandis que les vibrations sonores comprennent un nombre immense de molécules. Les ondes lumineuses, il est vrai, sont très-petites; mais enfin elles ont une longueur sensible,

déterminée et assignable ; c'est une pure affirmation que de dire qu'elles se passent entre les atomes matériels eux-mêmes ; si la lumière et le calorique résultent des vibrations d'un éther matériel, de telles vibrations ne peuvent traverser un corps sans le faire vibrer en entier (pas plus que l'azote ne pourrait vibrer seul dans l'air), et alors le calorique et la lumière deviennent non seulement analogues, mais identiques au son, dont aucune argumentation solide ne peut plus les distinguer. Si le calorique et la lumière sont dus, au contraire, aux vibrations d'une substance universelle, comme le démontre leur propagation par les espaces célestes, de telles vibrations ne peuvent plus se transmettre par simple communication aux molécules matérielles des corps. — Fresnel avait entrevu déjà qu'un certain nombre de phénomènes d'optique ne sauraient avoir lieu si l'éther luminique n'est pas partiellement libre dans les corps. M. Lamé, dans son remarquable ouvrage sur l'élasticité, a récemment démontré, qu'en effet il faut admettre qu'une partie d'éther est en quelque sorte fixée et retenue dans les corps, tandis qu'une autre y circule aussi librement que si les corps n'existaient pas.

Cette proposition peut être regardée comme l'énoncé d'une vérité conquise définitivement.

3° *Puissance d'expansion. Etat dans les corps.*

Mais le calorique n'agit pas seulement comme agent transmissible de chaleur ; il se manifeste comme capable de tirer la matière du repos, et de l'y faire rentrer, comme puissance d'équilibre dans les corps, comme force en un mot, quelque sens qu'on attache provisoirement à ce mot. Ici nous rentrons de plein pied dans notre sujet particulier. — Je puis me permettre de devenir à la fois concis et tranchant pour aller plus rapidement au but.

Les vibrations d'une substance non inerte ne peuvent se communiquer à la matière. Ce n'est en aucune façon par les vibrations d'un éther qu'on peut interpréter l'action du calorique comme principe de mouvement des molécules, pas plus d'ailleurs que l'action d'aucun autre principe capable de se manifester comme force. Supposons cependant, pour un moment encore, que nous n'ayons rien

démontré relativement aux qualités nécessaires qu'il faut reconnaître à la substance universelle qui remplit l'espace et les corps. Admettons que le calorique ne soit que le résultat d'un mouvement vibratoire matériel. Il faudra que cette hypothèse, déjà surabondamment réfutée, subisse toutes les conséquences que nécessite ici l'intervention de la matière. Je spécifie de suite pour être plus clair ; — si le mouvement des pistons d'une machine à vapeur ne résulte que de la transformation d'un mouvement vibratoire de la vapeur en un mouvement de translation ; si par conséquent la force motrice que nous donne la vapeur n'est qu'une extension du principe général de la conservation des forces vives :

1° *Jamais il ne pourra y avoir de travail mécanique produit, sans qu'il ne disparaisse une quantité équivalente de calorique* ;

2° *Et, en thèse générale, il ne pourra jamais y avoir, de quelque phénomène qu'il s'agisse, des quantités différentes de calorique développé ou détruit par une même quantité de travail dépensé ou produit. En un mot, jamais l'*ÉQUIVALENT MÉCANIQUE *expérimental ne pourra varier le moins du monde* ([1]).

Mais nous savons maintenant :

1° Que dans nos machines sans détente, où nous obtenons de la force motrice par le simple passage de l'eau à l'état de la vapeur, le gaz aqueux n'éprouve aucun déchet de calorique par suite du travail produit.

Lorsque au contraire la vapeur se détend, elle perd de son calorique latent ; et dans l'eau de condensation d'une machine à détente, nous trouvons un déchet considérable de calorique.

2° Que l'équivalent mécanique expérimental de la chaleur est loin d'être un nombre constant, mais dépend au contraire de l'ordre

([1]) Il est nécessaire ici de se rappeler la distinction indispensable qu'il faut faire entre l'équivalent absolu et constant, et les équivalents relatifs que donne l'expérience (page 242).

de phénomènes où le calorique est développé ou disparaît, et où le travail est dépensé ou produit.

La constance de l'équivalent relevée par l'expérience ne prouverait pas que le calorique soit nécessairement la suite de vibrations matérielles, et serait tout aussi conciliable avec l'idée de l'équilibre général des forces entre elles. La variabilité de l'équivalent, au contraire, ne peut plus en aucune façon se concilier avec l'hypothèse d'une simple extension du principe des forces vives.

Que concluerons-nous maintenant de tout ce qui précède?

L'hypothèse des vibrations matérielles, en supposant même qu'elle rende compte des manifestations du calorique rayonnant, de la chaleur des corps, de leur dilatation, etc., est absolument inconciliable avec ce double fait :

1° C'est qu'il est possible d'obtenir de la force motrice, du travail sans que les vibrations cessent, sans qu'il disparaisse réellement du calorique;

2° Et d'un autre côté, c'est que la quantité de calorique qui disparaît et semble annihilé dans certains phénomènes, n'est pas constante d'un ordre de phénomènes à l'autre pour un travail égal produit, bien que dans le même ordre de phénomènes cette quantité soit proportionnelle à la quantité de travail engendré.

L'hypothèse de *vibrations matérielles* doit donc être rejetée radicalement, comme interprétation des phénomènes calorifiques.

Mais l'hypothèse de l'existence d'un éther calorifique dénué d'inertie, qui seul rend compte des phénomènes du calorique libre, rayonnant dans l'espace ou rayonnant à travers les corps, ou se propageant comme chaleur dans les corps, cette hypothèse ne rend nul compte de l'un des attributs les plus saillants du calorique, de sa faculté d'agir dans les corps, comme puissance motrice de leurs parties matérielles. Car une substance dénuée d'inertie, dénuée de pesanteur, ne saurait, par ses seuls mouvements, tirer du repos ou y faire rentrer la matière essentiellement inerte et pesante. Aucune

idée de représentation, aucune figure ne pouvant peindre à nos yeux l'action du calorique comme puissance motrice, et comme puissance d'équilibre, il faut bien que nous renoncions une fois pour toutes à nous figurer le calorique à ce point de vue. Et à l'hypothèse maintenant vérifiée de l'existence d'un éther calorifique, nous sommes bien obligés d'en adjoindre une autre subsidiaire et essentielle. L'éther n'est pas simplement une substance impuissante partout répandue et capable seulement de vibrer dans l'intérieur des corps où il est en partie libre, en partie assimilé ou *fixé* par la matière. Il faut au contraire le considérer comme doué d'une *activité* propre et spécifique, ne dépendant pas *immédiatement* des vibrations, mais pouvant être en quelque sorte éveillé par elles; et se manifestant alors en général comme puissance de répulsion intermoléculaire, comme principe d'équilibre et de mouvement des molécules corporelles; activité que nous ne saurons concevoir à l'aide d'aucune idée de représentation et que nous détruirons dans son essence même, dès que nous voudrons nous la *figurer*. La substance dont les vibrations donnent lieu au phénomène du calorique ne nous est connue évidemment comme chaleur que par le fait de ces vibrations. Son activité, au contraire, ne peut nous être connue que par les modifications qu'elle détermine dans les corps, et par l'état où elle les maintient. Lorsque l'activité de la substance s'est manifestée à nous, lorsqu'elle a rompu l'équilibre d'un corps de telle sorte que la modification du corps produit en dehors de lui un travail positif ou négatif, crée en un mot une somme positive ou négative de force motrice, il peut se présenter deux cas : 1° ou les vibrations qui avaient éveillé l'activité se propagent au dehors du corps et se dispersent; 2° ou elles cessent complétement. Ceci est un fait, et non une manière d'interpréter les faits : il y a au moins autant de phénomènes où il se produit ainsi du travail positif ou négatif *par dispersion ou concentration* des vibrations, que de phénomènes où le travail est créé ou absorbé par une annihilation ou un développement de chaleur. Le principe de Carnot qui, comme on sait, expliquait les effets de la force calorique en la comparant à la chute des corps, et se servant même du mot très-caractéristique de chute de calorique, chute de température, ce principe est tout aussi souvent applicable que le principe plus moderne qu'on a voulu lui substi-

tuer d'une manière absolue, et qui appelle improprement le mouvement une transformation de calorique. (Je ne rappellerai qu'un cas des plus frappants. Lorsqu'une machine à vapeur travaille sans détente, l'eau de condensation emporte *plus de calorique* que la vapeur n'en avait apporté de la chaudière. Non seulement cette vapeur n'en perd point en nous donnant de la force motrice, mais elle en reçoit en route par suite des frottements des pistons, etc.) Que dans les cas ou l'activité est actuellement liée à l'état vibratoire, il disparaisse une somme de vibrations proportionnée aux effets produits dans l'état moléculaire des corps, et proportionnée en conséquence à la somme de travail que produit la modification interne du corps, ce n'est là qu'une suite naturelle des lois générales de l'équilibre, et nullement une extension du principe des forces vives.

Ce que nous venons de dire du calorique s'applique rigoureusement à la lumière, à l'électricité; il n'est pas plus possible d'expliquer par des vibrations matérielles la moindre manifestation de ces principes que cela n'est possible pour le calorique. Et d'un autre côté, les vibrations d'un éther non inerte que l'on est conduit nécessairement à admettre, ne suffisent pas à rendre compte d'un ordre tout entier de fonctions que remplissent dans la nature ce qu'on a appelé les impondérables.

Les vibrations d'un éther électrique ne peuvent pas plus expliquer les seules manifestations de l'électricité, par exemple, comme puissance de combinaison et de décomposition chimiques, que les vibrations d'un éther gravifique ne pourraient rendre compte de l'attraction universelle de la matière par la matière. Il faut pour tous les impondérables, comme pour toutes les forces, ou comme pour la force prise collectivement, admettre dans la substance capable de se manifester par vibration, comme électricité libre par exemple, une activité qui peut être éveillée ou non, et qui constitue précisément le caractère dominant qu'affecte la force en général.

Au premier abord, il peut sembler que cette activité que nous attribuons au calorique, à l'électricité, comme collatéral à l'état vibratoire, comme pouvant être éveillée ou éteinte par suite de

ces vibrations, et comme pouvant aussi subsister sans elles, il peut sembler, dis-je, que cette activité est une hypothèse purement gratuite. Si l'on y regarde de près on verra, au contraire, qu'elle ressort tellement des faits qu'au bout d'un instant de réflexion elle ne paraît plus être que leur traduction, leur expression sous une forme particulière.

Quoi qu'il en soit, et si hypothèse il y a, je ferai remarquer que cette hypothèse est du moins la seule qui permette d'entrevoir l'origine d'une classe toute entière de phénomènes, que les recherches modernes ont définitivement acquise à la science. Je ne citerai que peu d'exemples ici, mais tous sont caractéristiques.

Lorsqu'on mêle dans l'obscurité des volumes égaux de chlore et d'hydrogène secs, les deux gaz restent indéfiniment en regard sans se combiner. A la lumière diffuse, la combinaison s'opère lentement; à la lumière solaire directe, il y a détonation. On peut à la rigueur soutenir ici, que la lumière fait vibrer les parties chlore et hydrogène en regard, et détermine ainsi leur union chimique. Sans nous arrêter à la singularité d'une interprétation attribuant un état stable et défini à un mouvement de va-et-vient, qui, s'il rapproche les parties, les éloigne ensuite, je ferai remarquer que cette interprétation tombe devant l'étude complète des phénomènes. Le chlore sec, exposé au soleil et mêlé ensuite à l'hydrogène, dans la nuit la plus profonde, se combine lentement avec lui (Silbermann). Or, ici on ne peut plus admettre que les vibrations du chlore, excitées par celles de la lumière, continuent indéfiniment jusqu'à ce qu'on ait mêlé le chlore à l'hydrogène. Il est au contraire très-aisé de concevoir que la lumière, ou vibrations de l'éther luminique, puisse éveiller l'activité de la substance capable d'agir comme puissance chimique; qu'elle détermine, par exemple, la polarisation électrique dans le chlore; qu'elle exalte la force électrique jusque là à l'état latent. Je me sers à dessein du mot exalter, parce que, en France du moins, quelques savants trop pointilleux en grammaire, en ont plaisanté, et que ce terme appliqué par Schœnbein à l'oxigène devenu ozone, est au contraire très-propre à exprimer ce qui se passe dans la réalité. L'ozone, en effet, après bien des discussions,

est regardé définitivement comme un oxigène où la puissance et la tendance à la combinaison chimique ont été augmentées, éveillées, exaltées par l'impression d'un agent impondérable : les vibrations électriques, par exemple. Un état continu et indéfini de vibrations, quelles qu'elles soient dans le gaz, devient ici inadmissible ; tandis qu'il est au contraire très-sensé d'admettre que l'activité de la substance, sans laquelle nulle combinaison ne se peut concevoir, puisse être éveillée dans le corps isolé, tout aussi bien que dans ce même corps en présence de celui avec lequel il va s'unir.

Enfin les remarquables découvertes de Lœwel, de Münster, sur la cristallisation, démontrent que l'air, par exemple, sans changer ni de poids, ni de volume, ni de combinaison, etc., peut au contact de certains corps être modifié de manière à favoriser ou à empêcher la cristallisation de certaines saturations salines, et que bien plus, cet air peut modifier la composition du cristal qui se forme, au au point de vue des quantités d'eau de cristallisation.

L'activité que nous prêtons à la substance, c'est-à-dire, la puissance qu'elle a de tirer la matière du repos ou de l'y faire rentrer, tout autrement que par le fait d'un mouvement antérieur qui existerait en elle, cette activité n'est ni un vain mot, ni une hypothèse : c'est la seule traduction possible des faits, et cette traduction n'est peut-être que trop littérale. La variabilité, la non-idendité permanente de cette activité, ressort encore d'une manière évidente des faits.

Ici se présente naturellement une question très-importante à laquelle j'ai déjà fait allusion. La lumière, le calorique, l'électricité sont-elles des mouvements différents d'une même substance, ou des mouvements à peu près analogues dans des substances différentes, mais coexistantes ?

Je l'ai dit, beaucoup des plus grands esprits de notre temps, par suite d'une aspiration très-élevée vers l'unité, penchent vers la première hypothèse. En tout cas, si, comme nous le pensons, cette opinion n'est pas conforme à la vérité, ce n'est qu'avec une extrême réserve qu'il est permis de la combattre pour le moment. Un jour

viendra, et il est très-rapproché peut-être, où les faits mieux étudiés encore décideront pour ainsi dire d'eux-mêmes. J'essaierai bientôt d'analyser cette question d'une manière sérieuse; mais il en est une autre à laquelle je dois m'arrêter d'abord, et que j'aurais dû traiter beaucoup plus tôt peut-être, si l'ordre logique de cette exposition l'avait permis.

Beaucoup de personnes, sans nier précisément la force en général, en font une sorte d'attribut de la matière. Nous ne pouvons, disent-elles, en aucune façon séparer la matière de la puissance en vertu de laquelle deux masses matérielles s'attirent à distance; la distinction que l'on ferait entre la matière et l'activité en vertu de laquelle toute matière tend à se concentrer, est donc purement nominale, et l'attraction (entre autres) n'est qu'une propriété de la matière. Je dois ici insister fortement, et le faire ressortir formellement. C'est cette manière d'interpréter qui est au contraire purement nominale et qui dérive d'une subtilité de langage. Il est certain que nous ne connaissons la matière que par l'activité qui nous la révèle, et que nous ne connaissons la force que par la matière sur laquelle elle se manifeste. Et, en ce sens, la matière est tout aussi bien une propriété de la force, que la force est une propriété de la matière. Il est certain de plus, et fort heureusement pour la stabilité de l'Univers, que ni nos disputes de métaphysique, ni nos opérations expérimentales, ne sépareront jamais la matière de la force; car si elles agissent l'une sur l'autre, c'est à l'aide d'une réciprocité symétrique de propriété dont nous ne saurions les dépouiller sans les faire cesser d'être ce qu'elles sont, sans les anéantir.

Mais est-ce là une raison pour soutenir que ces principes ne sont qu'un?

Parce que nous ne pouvons les isoler de fait, ne pouvons-nous pas et ne devons-nous pas logiquement les séparer par la pensée?

Un corps unique en repos, que nous supposons dans l'espace, ne pourrait sortir de son repos. Deux corps solides en contact ne sauraient non plus sortir du repos, si on les y suppose primitivement. Mais si ces deux corps sont séparés par un espace vide *en apparence*,

aussitôt ils *entrent en mouvement et se rapprochent*. L'intervalle de séparation est-il réellement vide? C'est ce que nul de nous ne peut admettre un seul instant; et c'est ce qui n'est pas non plus dans la réalité des choses. Cet espace est-il plein de matière en repos? Non, car cette matière, partageant avec les deux corps le mouvement qui y naît, elle le diminuerait, bien loin de pouvoir le causer. Est-il plein de matière en mouvement? Non encore, car un troisième corps, entièrement en mouvement, peut circuler dans l'espace sans rien perdre ni gagner dans son mouvement. Je conclus donc nécessairement que l'intervalle de séparation des deux corps est rempli d'une substance totalement différente en nature de la substance des corps elle-même, que, par opposition, j'appelle MATIÈRE INERTE, en raison de la qualité inhérente qu'elle a d'enlever par partage le mouvement aux parties en mouvement qui lui sont identiques. La substance qui remplit l'espace, ne s'opposant pas au mouvement, ne peut produire le mouvement par communication de ses propres mouvements antérieurs supposés. Je dis donc que c'est en vertu d'une activité particulière et en vertu d'une relation symétrique des propriétés entre la substance et la matière, que la substance, que j'appelle maintenant FORCE, tire du repos nos deux corps. La substance est-elle une propriété des deux corps, ou les deux corps sont-ils une propriété de la substance? c'est là une risible chicane de mots. Ce qui est en dehors des corps en est actuellement différent de nature, bien que je ne puisse l'en séparer et l'empêcher d'agir: je dois donc logiquement lui donner un autre nom. Je dis provisoirement ce qui est en dehors. Mais la puissance qui les sollicite l'un vers l'autre, agit en eux aussi, puisqu'elle met en rapport tout leur ensemble, toutes les parties de l'un avec toutes les parties de l'autre, et qu'elle met en rapport toutes les parties des mêmes corps qui autrement seraient susceptibles de se séparer et de se perdre dans l'espace infini.

La question à laquelle nous venons de répondre est, comme on voit, une question de mots et non de faits. Quand bien même on irait jusqu'à admettre encore une fois l'affirmative extrême du panthéisme, à savoir qu'il n'existe qu'une seule et même essence universelle, capable de se manifester comme principe mu, comme

moteur, comme vie et intelligence, il n'en demeurerait pas moins manifeste que ce qui est actuellement *entre deux corps* qui s'attirent à distance, est autre aussi actuellement que ces corps eux-mêmes.

L'étude raisonnée et sévère des phénomènes physiques nous force à admettre maintenant l'existence de deux classes de principes de nature différente. Si nous nommons MATIÈRE les principes de l'une de ces classes, nous sommes forcés par les faits de donner un nom autre et plus général aux principes de l'autre classe. Sans sortir du dictionnaire du sens commun et de la langue toute vulgaire, nous trouvons le mot SUBSTANCE, qui répond très-bien à la deuxième classe de principes.

Les principes auxquels s'applique le nom collectif de SUBSTANCE sont universellement répandus, et sont essentiellement indéfinis de forme. La gravité, la lumière, le calorique, etc., se manifestent à l'infini à travers l'espace : la substance qui, par son activité et ses mouvements donne lieu à leur manifestation, est donc illimitée. La matière au contraire est, sinon finie, du moins localisée dans l'espace d'une manière définie. Ce que nous appelons corps, c'est la matière concentrée et localisée sous forme finie dans l'espace par l'activité de la substance.

Un corps dans son intérieur est évidemment formé à la fois de matière et de substance, puisque ses parties réagissent à distance les unes sur les autres, comme s'il ne se trouvait pas de matière entre elles. Si la matière est divisible à l'infini, un corps est à la fois substance et matière, puisqu'il n'y a aucun point où la matière fasse réellement place à la substance. Si au contraire la matière est constituée en atomes indivisibles, un corps est une agrégation d'atomes réunis par l'activité de la substance. Mais que la matière soit ou non divisible à l'infini, toujours est-il que tout corps peut être considéré comme limité par une nappe géométrique en deçà de laquelle il y a matière et substance, au delà de laquelle il n'y a plus que substance pure. Ce que nous disons ici est vrai d'une manière absolue pour les corps célestes séparés entre eux par d'immenses intervalles où il ne peut plus exister de matière, mais

demeure encore vrai d'une manière relative pour les corps que nous séparons par la pensée dans un corps unique. Ainsi, sur notre terre, tout ce que nous distinguons, constitue en définitive un seul tout, qui est le globe terrestre. Mais il n'en demeure pas moins manifeste que deux parties corporelles, entre lesquelles se trouvent d'autres parties corporelles, réagissent l'une sur l'autre absolument comme si l'intervalle de séparation était purgé de matière. C'est la substance qui, par son activité ou par la diversité des mouvements dont elle est capable, établit exclusivement les rapports, les relations des corps entre eux.

Pour spécifier d'une manière caractéristique, nous pouvons donc appeler PRINCIPES INTERMÉDIAIRES, les composants de la substance universelle et indéfinie de forme qui détermine la formation des corps et maintient leurs relations, leurs rapports constants. Nous verrons bientôt qu'à un tout autre point de vue, cette qualification est encore très-convenable.

Par opposition, nous pouvons appeler la matière PRINCIPE PASSIF : non que la matière soit passive dans son essence, car elle ne pourrait alors pas se trouver en relation avec les substances, mais simplement parce qu'un point matériel ne saurait se modifier, se mouvoir qu'à la condition d'être mis, *par un intermédiaire*, en rapport d'équilibre avec un autre point matériel, séparé de lui par un intervalle sensible.

Maintenant devons-nous admettre qu'il n'existe qu'une seule matière et une seule substance intermédiaire ?

S'il n'existe qu'une seule et unique matière, les principes que nous distinguons sous le nom d'éléments chimiques doivent leurs qualités actuelles à un mode spécial, mais accidentel, de relation des parties disjointes de la matière avec les forces. Dans ce cas, on ne peut alléguer aucune raison plausible contre la possibilité de la transmutation d'un élément en un autre, et il ne doit plus être permis à qui que ce soit, de rire des alchimistes. — Si, au contraire, la matière se subdivise en individus ayant des qualités spécifiques, les propriétés des élémens chimiques n'en dépendent pas moins d'un

mode de rapport spécifique entre les parties disjointes de la matière et les forces; mais ce mode devient immuable puisqu'il dérive de la nature particulière de l'individu lui-même, et dès lors la transmutabilité des éléments devient une impossibilité et une fiction. Ce qui, soit dit en passant, n'autorise encore qui que ce soit à rire des alchimistes, qui sont en réalité les vrais fondateurs de nos sciences d'observations expérimentales, et qui, quoi qu'on en puisse dire, ont mis dans leurs pénibles et longues recherches plus de conscience que n'en mettent aujourd'hui bien des railleurs.

Je pense qu'en présence de faits innombrables, qu'il est inutile d'invoquer ici, peu de chimistes modernes peuvent encore avoir la moindre illusion sur la possibilité d'une transmutabilité. Mais, comme je l'ai dit, la stabilité de l'élément chimique ne peut dériver que de l'immanence, que de la stabilité inaltérable et première des propriétés spécifiques, qui déterminent son mode de relation avec la force et par suite avec les autres éléments.

Nous devons donc admettre comme démontré, qu'il existe autant de matières spécifiquement diverses, qu'il y a d'éléments chimiques réels dans l'Univers.

J'ai dit qu'en ce qui concerne la diversité ou l'unité arithmétique dans la substance intermédiaire considérée collectivement, nous sommes tenus à une bien plus grande réserve dans l'énoncé d'une opinion. Ici ce n'est en effet pas sous une seule face que nous pouvons attaquer la question : elle est des plus multiples.

4° *Rapport du calorique avec les autres impondérables.*

Il existe entre les manifestations électriques, calorifiques, lumineuses, une dépendance manifeste, et une réciprocité d'action qu'on ne saurait trop mettre en relief, et bien que très-positivement on ne puisse pas jusqu'ici citer un seul fait précis, qui permette de croire à une transformation réelle d'une manifestation en une autre, du moins faut-il reconnaître qu'il existe une loi générale d'équilibre entre toutes.

Le calorique, en mille et mille occasions, ainsi que la lumière,

peuvent exciter le développement de la polarité ou du mouvement électriques : l'électricité de même est capable de développer chaleur et lumière. — On a, comme de coutume, fait jouer ici en général un rôle beaucoup trop important à la matière. On a dit, par exemple, que l'électricité fait vibrer la matière, et que la matière, à son tour, fait vibrer la lumière. Ce qui signifierait que l'électrité n'a aucune prise directe sur la lumière, et que celle-ci ne peut éclater là où il n'y a pas de matière. Il suffit d'examiner sérieusement le moindre des phénomènes pour reconnaître que c'est bien plutôt le contraire qui est vrai, et que la matière localisée dans l'espace, sous forme de corps, ne sert que de *lieu* de théâtre aux manifestations des impondérables.

Si, à l'aide d'un appareil convenablement disposé, on fait passer l'électricité d'une bouteille de Leyde à travers l'air ou tout autre gaz, que l'on peut comprimer ou raréfier, on remarque que plus on comprime le gaz, plus on est obligé de rapprocher les conducteurs en regard, pour faire partir l'étincelle, et plus celle-ci devient vive; au contraire, quand on raréfie le gaz, on peut de plus en plus augmenter la longueur de l'étincelle, qui gagne aussi en diamètre apparent et pâlit de plus en plus. On avait conclu de là, d'abord, que dans un espace totalement purgé de gaz et de matière, il n'y a point de lumière électrique. Cette déduction était fausse : car pour conserver à l'étincelle électrique tout son éclat, en dépit de la raréfaction la plus parfaite, il suffit de maintenir la même distance aux deux tiges métalliques en regard, et de forcer l'étincelle à garder un petit diamètre en la faisant passer par un tube capillaire en verre. La diminution de la lumière n'est donc qu'apparente, et provient de ce que la même quantité de ce principe se manifeste, dans un cas, en un espace très-considérable, et dans l'autre cas, dans un espace très-limité. La manifestation, ou, si l'on veut, le mouvement électrique, peut donc éveiller directement les manifestations de lumière et de chaleur dans la substance intermédiaire qui remplit l'espace. Et si l'on examinait sévèrement les phénomènes, où la chaleur, la lumière et l'électricité se développent réciproquement les unes les autres, on reconnaîtrait que les corps, pour la plupart du temps, ne sont que le *lieu*, le théâtre où s'accomplit l'action réciproque des

trois principes, et que le mouvement de la matière qui compose ces corps est beaucoup plus souvent une conséquence qu'une cause de l'action.

Nous disons qu'une loi d'équilibre générale semble régir les rapports réciproques des manifestations diverses des principes impondérables; et c'est dans les conséquences de cette loi que beaucoup de physiciens ont trouvé la preuve d'une transformation réelle de ces manifestations les unes en les autres. En ne nous arrêtant, comme exemple, que sur l'un des phénomènes étudiés dans ce travail, nous trouvons la démonstration presque péremptoire d'une loi d'équilibre.

Il est impossible d'assimiler le corps des animaux et de l'homme, considéré comme source de force motrice, à un moteur à calorique, à un moteur à feu. Ce n'est positivement point au calorique que l'on peut attribuer la contraction musculaire; et sans trop trancher ici une question sur laquelle nous reviendrons bientôt, nous pouvons admettre que c'est le principe électrique, qui, sous l'influence de la volonté, se trouve mis en jeu dans les conducteurs nerveux et va déterminer le mouvement des muscles (¹). Si, comme nous l'avons vu, un poids d'oxigène absorbé pendant l'acte respiratoire, produit d'autant moins de calorique dans notre corps que celui-ci produit plus de travail externe, c'est que très-positivement il faut admettre qu'il y a une substitution d'une manifestation d'impondérable à une autre, et que ce que l'assimilation de l'oxigène produit de moins en calorique, elle le produit en plus en électricité, *ou tout autre principe qu'on regardera comme cause de la contraction musculaire.* — Toutefois ici s'applique encore dans toute sa force ce que j'ai dit de la variabilité de *l'équivalent mécanique expérimental* de la chaleur.

La grande différence qui existe, par exemple, entre l'équivalent mécanique dans les frottements médiats, et l'équivalent de la chaleur humaine, prouve que si, quant à ce dernier, il y a proportion-

(¹) Ce fait a été démontré récemment par les recherches étendues de M. Du Bois-Reymond.

nalité entre le calorique non développé et le principe de la contraction musculaire qui s'y substitue, on n'est pas autorisé le moins du monde à regarder comme constant d'un ordre de phénomènes à un autre, *le quotient de la quantité non développée, divisé par la quantité du principe substitué à lui.*

Si l'on admet comme juste l'expérience de l'un des physiciens les plus habiles de notre époque (Melloni, Thermochrose), nous dirons avec Melloni que le calorique, dans certains cas, peut tirer le principe électrique de son état de repos, *sans disparaître lui-même*, et par le seul fait de son mouvement de propagation d'un métal dans un autre. L'idée d'une transformation devient ici absolument inadmissible, et le principe de Carnot, si opposé à cette idée, trouve ici une application d'un genre tout particulier. — Les deux manifestations qui ont évidemment le plus de ressemblance, ce sont celles de la lumière et du calorique appelé rayonnant. Cette ressemblance est en quelque sorte consacrée par un proverbe scientifique : « Qui dit lumière dit chaleur ». Réflexion, réfraction, polarisation, interférences, tout leur est commun. Melloni, qui a mis en relief ces caractères de ressemblance, a fait tous ses efforts pour démontrer l'identité des manifestations luminiques et calorifiques. A-t-il réussi ? Il me semble que le contraire découle directement de ses propres recherches. — Nous avons trois instruments de la plus grande sensibilité : l'un nous a été donné par la nature, c'est notre organe visuel ; l'autre, c'est la plaque daguerrienne : ce sont les deux *luminoscopes* les plus parfaits que l'on puisse imaginer ; le troisième, c'est le thermoscope de Melloni, le thermomètre le plus impressionnable dont on ait pu doter la science expérimentale. Nous faisons passer la lumière d'une lampe Carcel par une plaque de verre blanc : l'œil, le daguerréotype et le thermoscope sont impressionnés *par ce qui traverse* la plaque. A celle-ci nous substituons une lame d'eau assez épaisse : l'œil et le daguerréotype sont impressionnés comme tout-à-l'heure ; mais le thermoscope reste *muet*. Au verre blanc et à l'eau nous substituons un verre *noir :* l'œil et le daguerréotype n'accusent plus aucune impression, mais le thermoscope au contraire accuse une impression presqu'aussi énergique qu'avec le verre blanc. Est-on autorisé à dire que c'est un même principe

qui se manifeste à travers nos trois milieux, et qui tour à tour reste muet pour les trois appareils les plus délicats, mais aussi les plus opposés? Où ne devons-nous pas plutôt dire qu'il y a analogie parfaite entre le principe calorique et le principe lumière; mais que l'identité ne peut être admise (¹)?

En somme, et pour nous résumer sous la forme la plus réservée d'ailleurs, nous voyons :

1° Que la MATIÈRE proprement dite peut et doit logiquement être considérée comme composée d'individus spécifiquement différents entre eux, mais ayant tous des attributs communs qui les rangent dans une seule et même classe.

Ces individus distincts doivent leurs caractères spécifiques et distinctifs à un ensemble de qualités primordiales et immanentes, qui déterminent leur mode de rapport, immanent aussi, par suite, avec les diverses manifestations de la force ou avec les diverses forces.

2° Que la SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE en général peut encore être logiquement subdivisée en individus coexistants et capables de se manifester chacun d'une manière qui lui est propre; mais qu'ici la nécessité de la subdivision n'est pas encore évidente par elle-même. Tout ce qu'il est permis d'affirmer pour le moment, c'est que si la gravité, l'attraction moléculaire, la lumière, le calorique, l'électricité, sont effectivement des manières d'être et des modes d'activité d'une seule et même substance intermédiaire universelle, il n'y a du moins aucun fait qui jusqu'à présent le démontre; et que, d'un autre côté, il y a déjà un certain nombre de faits qui doivent nous faire pencher vers une idée contraire, vers une classification de la substance intermédiaire elle-même en individus distincts, et que,

(¹) S'il était permis à un auteur de citer les résultats de ses propres recherches, avant qu'ils n'aient été sanctionnés par d'autres observateurs, je renverrais le lecteur aux conclusions du chapitre VIII, p. 125 de ce travail. Mes expériences, *supposées justes*, tranchent la question discutée dans le texte, et démontrent positivement que la lumière ne saurait être, à aucun titre, *assimilée* désormais au calorique, même rayonnant.

dans tous les cas, chacune des manifestations spéciales ne peut, à aucun titre, être identifiée avec une autre. Si, par exemple, le calorique et la lumière sont les mouvements d'une même essence, il existe en tous cas, entre les conséquences de ces mouvements, une *différence spécifique* que rien ne saurait expliquer jusqu'ici ; une différence qui devient même de jour en jour plus difficile à concevoir, puisque l'étude des phénomènes prouve de plus en plus l'identité de la forme vibratoire de ces mouvements.

SECONDE DIVISION.

La subdivision des essences constituantes de l'Univers en deux groupes, les MATIÈRES et les SUBSTANCES INTERMÉDIAIRES, est à la fois nécessaire et suffisante pour expliquer les phénomènes du monde physique.

Est-elle nécessaire aussi et suffisante pour rendre compte de l'ensemble des phénomènes de la vie organique ?

La subdivision est-elle nécessaire ?

La réponse ne saurait présenter un seul instant de doute. Ce qui est nécessaire à la constitution d'un corps quelconque, d'un élément chimique, d'un composé, l'est aussi à la constitution corporelle des êtres vivants. Il est inutile de s'arrêter sur une telle question.

La subdivision est-elle suffisante ? N'existe-t-il dans l'univers que MATIÈRE et FORCE ?

Posées par la science humaine à toutes les étapes de son développement successif, ces interrogations ont un caractère de grandeur solennelle, fait pour intimider, au premier abord, l'esprit le plus hardi,

le plus dévoré de la soif de connaître. Elles sont appelées à faire substituer tôt ou tard, à la foi aveugle et ignorante commandée par l'autorité, la connaissance acceptée et imposée par la raison ; elles sont appelées tôt ou tard à faire bénir ou maudire la science audacieuse qui les a posées comme un défi à sa propre puissance.

Et cependant nous ne saurions songer un seul instant à les éluder dans un travail à la fois expérimental et philosophique, où nous avons interrogé la loi de l'équilibre général des forces, où nous avons fini par démembrer en quelque sorte l'essence constitutive des éléments, où nous avons prononcé le mot *d'équivalent mécanique* de la chaleur humaine.

Le corps d'un être vivant quelconque ne saurait être assimilé à un corps ordinaire détaché de la surface de la terre. Celui-ci est, ou du moins peut être homogène dans toutes ses parties ; il peut être divisé en fragments, qui dans de certaines limites du moins, ne diffèrent de l'ensemble qu'en dimension ; il est *un*, il reste, ou du moins il peut rester indéfiniment dans le même état, tant qu'une cause étrangère ne vient pas du dehors rompre l'équilibre de ses parties. Celui-là au contraire n'est aucunement homogène, et l'homogénéité semble entièrement opposée à sa loi d'existence ; il est formé d'organes distincts qui ont tous une fonction propre à remplir et dont on ne pourrait les priver sans le faire cesser d'être ce qu'il est ; le repos interne des parties constituantes est encore en opposition formelle avec la loi d'existence de l'être vivant qui naît d'un germe, grandit et se développe au dépens des éléments du milieu ambiant, et chez qui le repos des parties intégrantes, constituantes, ne saurait exister un instant infiniment petit, sans entraîner la mort, terme final et fatal de tout être vivant, terme où le corps vivant devient un corps ordinaire, entièrement semblable à ceux du monde physique.

Sous plus d'un rapport donc l'être vivant ne peut, *tout au moins*, être assimilé qu'à une machine mouvante organisée de manière à accomplir un certain nombre de fonctions comme être collectif, et à se continuer, à se réparer sans cesse d'elle-même pendant une

certaine période de temps. Nous disons *tout au moins* : le nom de machine est en effet le titre le plus bas que l'on puisse donner au plus infime des êtres vivants.

Sont-ce les forces et les éléments matériels qui, par leurs unions diverses, leurs relations multiples, par leurs manifestations les plus varises, peuvent expliquer à elles seules la formation et les fonctions d'un être vivant?

Remarquons d'abord qu'un être vivant, dès le moment où il naît, tire du milieu ambiant tout ce qui est nécessaire à son existence; il ne crée rien, il choisit simplement dans ce qui l'entoure les parties qui conviennent à son organisme; si des parties, qui ne lui conviennent pas, lui sont *imposées*, son organisme fait un effort suprême pour les éliminer, et si l'effort est inférieur à la puissance d'agression, la vie cesse. — Si donc un principe spécial est par hasard nécessaire à la constitution de l'ensemble d'un être vivant, ce principe est, une fois pour toutes, en lui qualitativement et quantitativement, depuis le moment de sa naissance jusqu'à celui de sa mort. Ce principe ne peut à aucun titre être assimilé à une FORCE. Le caractère essentiel des substances capables de se manifester comme forces, comme agents de relation, comme intermédiaire, en un mot, c'est d'être universellement répandues et indéfinies dans leurs formes. — Une substance intermédiaire, par suite de ses rapports avec la matière, peut bien, là où par son activité elle a concentré et localisé celle-ci, affecter des attributs quantitatifs et qualitatifs plus intenses, si l'on peut s'exprimer ainsi, qu'elle ne le fait là où elle est pure de toute matière; — mais l'espace universel ne peut être spolié de substance, car les relations spéciales d'êtres à êtres distincts deviendraient impossibles. Une force, qui ne serait que dans un être vivant et non au-dehors de lui, ne serait plus une force; et si elle est partout autour de lui, elle doit se manifester partout et pas seulement dans l'être vivant. Le mot de *forces organiques*, *de forces vitales*, est un non-sens. Si les substances intermédiaires universelles et la matière ne suffisent pas pour rendre compte des phénomènes de la vie, un principe de nature spéciale, et totalement distinct, peut seul être invoqué pour une interprétation logique et raisonnable.

Les principes constituants de l'Univers qu'un être vivant appelle à lui, y arrivent avec toutes leurs propriétés, et c'est même uniquement pour cela qu'ils arrivent et qu'ils sont appelés.

Les éléments chimiques se combinent ou se séparent dans un corps vivant par suite des mêmes lois qui les gouvernent dans le monde physique. L'hydrogène, le carbone, l'azote, le phosphore, qui s'associent ou se désassocient dans mon cerveau, au moment où j'écris ces lignes, sont les mêmes que ceux que nous trouvons partout autour de nous; et c'est même uniquement parce qu'ils sont tels, que mes organes les ont choisis. — La lumière, le calorique, l'électricité, qui se manifestent pendant ces réactions, sont les mêmes que ceux qui se manifestent sur le soleil, dans la flamme d'une bougie, etc., et c'est encore par cette raison que notre organisme cherche sans cesse à les tirer du repos.

Il n'existe à proprement parler qu'une seule chimie, qu'une seule physique; le nom de chimie organique ne peut être regardé que comme indiquant une application d'une science générale, et non comme une nouvelle science. Mais suit-il de là que les combinaisons qui se font dans l'organisme d'un être vivant soient absolument identiques à celles que nous opérons dans nos laboratoires?

En dépit de tous les efforts qu'on a faits pour en tirer une réponse affirmative, l'étude directe des phénomènes répond ici négativement. Nous ne pouvons produire artificiellement et de toutes pièces qu'un nombre excessivement limité de matières organiques. Nous voyons de plus journellement que les réactifs que nous introduisons dans l'organisme d'un être vivant ne s'y comportent que très-rarement, comme ils le font sur les mêmes matières mortes. Tel acide qui coagulerait le sang tiré de la veine, telle dissolution métallique qui le précipiterait, traverse le courant de la circulation sans occasionner aucun phénomène semblable, et détermine même dans le corps vivant des modifications tout opposées à celles qu'en attendait le chimiste.

Quels sont les secours que la médecine toxicologique, et la médecine en général ont reçus de la chimie? Nous laissons ici à tout

médecin consciencieux et versé dans sa science le soin de répondre.

Mais la chimie, fût-elle capable de produire directement tous les principes immédiats des êtres vivants, est absolument incapable à elle seule d'expliquer l'organisation proprement dite de ces principes.

L'affinité chimique règne évidemment dans les corps vivants comme ailleurs ; mais il est tout aussi visible qu'elle y est en quelque sorte gouvernée, réglée : ce qui ici reste parfaitement dissout et combiné dans la sève, dans le sang, va là se séparer et servir à la nutrition, à l'entretien d'un organe, ou se filtrer, se modifier, au contact de cet organe, pour aller en nourrir d'autres, ou pour être rejeté comme détritus devenu inutile. Ce qui ici s'organise d'une certaine façon, s'organise là d'une autre, ou se désorganise ailleurs. L'affinité chimique, partout sans cesse en jeu, est évidemment au service d'une puissance directrice qui en agrandit ou en diminue l'énergie, et qui ainsi localise les produits, qu'elle, seule, peut engendrer.

La chimie, qu'on a nommée bien improprement d'ailleurs *chimie vivante*, ressemble à peu près à celle que nous fonderions, si tous les éléments que nous mettons en rapport se trouvaient sans cesse, à notre insu, soumis à l'action directrice de courants galvaniques d'intensité et d'amplitude variées. Dans de telles conditions nous verrions, par exemple, un globe de mercure placé dans une capsule de sel ammoniac se gonfler, centupler de volume en se combinant avec l'hydrogène et l'ammoniac ; et puis, changé de place, retiré de la capsule, se décomposer avec une rapidité explosive. Nous verrions les acides les plus énergiques traverser la teinture de tournesol sans la rougir, etc. L'affinité n'existerait-elle plus, par hasard, et faudrait-il inventer une *chimie galvanique?* Non, assurément ; mais elle serait dirigée, gouvernée par des modifications particulières dans l'activité de la substance intermédiaire, qui, par ses rapports avec les éléments matériels, est très-probablement aussi la cause première des phénomènes de combinaison et de décomposition.

La comparaison que l'on a faite à diverses reprises déjà, et toujours avec plus de justesse à mesure que le cercle des connaissances précises s'élargissait, la comparaison qu'on a faite entre l'organisme d'un être vivant et un appareil galvanique *sui generis*, peut être acceptée aujourd'hui, sinon comme l'expression absolue de la vérité, du moins comme une image très-approximative, et en tous cas raisonnable et acceptable (1).

L'électricité suffirait-elle donc pour rendre compte des phénomènes du monde vivant?

Continuons notre étude rapide et synthétique des phénomènes, et laissons ceux-ci parler.

L'être vivant, quel qu'il soit, constitue une unité; il est formé des parties les plus diverses qui sont en rapport, en relation, et qui, par les fonctions qu'elles accomplissent, tendent vers un but commun, l'existence de l'être comme ensemble et comme unité organique. De cette unité, par l'acte spécial de la reproduction, peuvent sortir, et ne peuvent sortir que des unités semblables. — On a souvent admis, mais il faut le dire, beaucoup plus pour le besoin d'un système que d'après l'examen des faits connus, qu'une espèce vivante pouvait se transformer en une autre sous l'influence de modifications dans le milieu ambiant où elle vit. Ce qui est aujourd'hui bien constaté, c'est que les individus d'une même espèce peuvent, par des causes longtemps soutenues, se perfectionner ou se dégrader dans une certaine mesure; que leurs apparences peuvent varier, osciller entre de certaines limites dont l'écart est assez restreint; mais que, placés dans leur milieu normal, ils tendent à revenir constamment vers un type primitif, qui sert en quelque sorte de modèle à l'espèce. La transmutabilité d'une espèce en une autre ne saurait désormais pas plus être admise que la transmutabilité des éléments chimiques (2). D'un autre côté, ce qui ne peut non plus être con-

(1) Voyez les travaux récents de M. Du Bois-Reymond.

(2) Dans une esquisse aussi rapide, j'ai dû éviter toutes les citations de faits par trop détaillées; mais en procédant ainsi je m'expose, ou à sembler présenter comme

testé, c'est qu'à un point de vue d'ensemble général, les espèces forment entre elles une sorte de série, une échelle ascendante, dont les degrés sont tellement rapprochés qu'il n'est plus possible d'entrevoir des différences radicales de nature d'une espèce à l'autre.

prouvé ce qui n'est pas du tout reçu encore de tout le monde, on a semblé éluder à dessein ce qui pourrait réfuter certaines conclusions trop tranchées. La question de la non altérabilité des espèces est trop grave pour que je ne cite pas ici brièvement certains faits indispensables.

1° Les générations spontanées ont toujours été invoquées pour prouver que la vie a pu naître sur notre globe par le fait seul des propriétés naturelles des éléments qui le composent et sans l'intervention d'un principe nouveau. Et de plus, que la vie a pu s'élever ensuite de degré en degré, à mesure que le milieu ambiant devenait plus propre à telle ou telle espèce.

Expérimentalement parlant, on est parfaitement en droit de nier radicalement les générations spontanées proprement dites : toutes les prétendues générations ne se manifestent que *dans un milieu formé de débris organiques*, c'est-à-dire *de matières qui ont déjà servi à la vie*, et l'on ne peut pas, jusqu'à présent, citer un seul exemple de la production d'un être vivant dans un milieu formé seulement d'air et de matières inorganiques; et cependant un tel milieu est parfaitement adapté à la vie de certains êtres : la plante n'en réclame point d'autre.

2° Les merveilles et les miracles du monde des infusoires et des autres microscopiques ont comme tous les miracles, diminué en nombre à mesure qu'on a su et pu mieux observer : ils ont décru en raison inverse du pouvoir amplifiant du microscope et de l'art de s'en servir. Beaucoup d'êtres que nous appelions des ébauches, des essais de la nature, des *expériences imparfaites*, nous ont donné une rude leçon et nous montrent qu'il n'y a d'imparfait que notre vue.

Le grain de blé, qui *dort* depuis 4000 ans dans les pyramides d'Égypte, germe dès qu'on lui donne un peu de terre, d'eau, d'air et de lumière. De quel droit soutiendrait-on que des germes ne dorment pas par millions, trop petits pour être vus, qui s'éveillent dès que le milieu ambiant permet le développement de leurs fonctions.

4° Si un naturaliste avançait de sang froid que le papillon, l'œuf, la chenille, la chrysalide, sont autant d'individus d'espèces différentes, un rire universel accueillerait une telle affirmation. Mais n'est-il pas risible aussi de soutenir que dans les échelles inférieures si indistinctes pour nous, il ne puisse y avoir des métamorphoses analogues à celles des insectes, et qui durent plus ou moins, selon le milieu ambiant.

5° Tel sourit à la naïveté de l'homme simple qui admettrait qu'un oiseau se forme au sein de l'air, ou qu'un œuf s'organise dans le sable, devrait admet-

Si des caractères qui nous font distinguer les espèces, et qui ne portent en général que sur les formes, sur les apparences physiques internes ou externes, nous passons aux fonctions que remplissent les individus de chaque espèce, aux actes de tous genres qu'accomplit chaque *machine vivante*, nous trouvons encore, et d'une manière

il pourtant la même chose dans un monde plus réduit; et n'est-ce point d'une question de faits vrais et réels faire une question de grandeur toute relative à nous?

6° Un germe n'est point une simple cellule organique à laquelle viennent s'en superposer d'autres, comme on l'a dit si souvent. Un être vivant, en se développant, ne traverse pas, comme on l'a dit, toutes les phases que représentent les êtres inférieurs à lui : un homme n'est pas d'abord plante, puis animal, puis homme. Un germe peut mourir, ou dormir, ou se développer ; mais dès qu'il se développe, l'être, et le seul être qu'il puisse produire, se manifeste. L'époque où nous reconnaissons cet être ne dépend que de notre puissance d'observation. Les progrès de l'embryologie hâtent tous les jours cette époque. Un germe renferme toute la virtualité de l'être seul auquel il peut donner naissance.

7° Si la nature procédait jamais par ébauches, si elle tâtonnait dans ses œuvres, nous devrions trouver dans les débris des diverses périodes géologiques les témoignages des transitions, des transmutations d'une espèce à une autre ; et c'est cependant bien le contraire que nous observons. Parmi les races qui répondent aux diverses époques géologiques, nous trouvons, il est vrai, des êtres qui n'existent plus aujourd'hui, et qui pourraient passer pour des moules primitifs épuisés ; et aujourd'hui il existe beaucoup d'êtres qui ne se trouvent non plus parmi ceux qu'on appelle assez improprement anté-diluviens. Mais le fait n'est nullement général, et à côté d'espèces éteintes, s'en trouvent en grand nombre qui vivent aujourd'hui telles quelles.

8° La persistance des divers types qui forment l'ensemble de la race humaine est certainement, en toute hypothèse, un des faits les plus frappants. Si des réflexions critiques pouvaient-être de quelque utilité dans une discussion scientifique, nous ferions remarquer, en passant, que les personnes qui, pour l'ensemble des doctrines qu'elles acceptent comme article de foi, auraient eu le plus d'intérêt à défendre la persistance du type humain en général, ont peut-être fourni le plus d'armes à ceux qui prétendent que l'homme peut être issu par une longue suite de circonstances favorables de l'espèce singe. Soutenir qu'en moins de 2000 ans le blanc a pu être modifié en nègre, etc., c'est aller certainement bien plus loin que les partisans des transmutations animales ; nous disons 2000 ans, la tradition biblique fixe en effet à peu près à 6000 ans l'âge de l'humanité, et le nègre, comme d'ailleurs d'autres races, existaient il y a 4000 ans déjà. Les partisans des transmutations du moins (rompant d'ailleurs ici avec toutes les données historiques) recourent à des centaines de mille ans pour légitimer leur hypothèse.

remarquable, un enchaînement gradué, des points de soudure insensibles et une marche ascendante dans ce que l'on peut nommer le titre des fonctions.

Lorsque dans l'examen des êtres vivants nous nous plaçons vers le milieu de l'échelle et que nous nous élevons de plus en plus, nous voyons apparaître plus clairement les manifestations d'une puissance caractéristique. Chaque individu, en agissant, sait qu'il agit; il a la conscience de l'acte, et bien que toujours visiblement sollicité à cet acte par une cause, il est, du moins dans de certaines limites dont l'amplitude varie, libre d'acomplir l'acte à tel ou tel moment. Ces actes, les fonctions auxquelles ils se rapportent, dans l'organisme, le mode selon lequel ils s'exécutent, constituent dans l'être vivant ce que l'on a nommé avec justesse la *vie de relation*, contrairement à l'ensemble des actes et des fonctions qui se font en apparence d'une manière passive, à l'insu de l'individu, et qui ont en général pour objet l'utilisation des éléments cherchés dans le milieu ambiant par un acte volontaire. Si nous ne savons nous élever à une certaine

Il est cependant une petite peuplade qui semble se perpétuer tout exprès pour fournir une preuve vivante qui contredit ce qu'on veut conclure de sa propre tradition. Le peuple hébreux vit sous les mêmes climats que nous, sous les tropiques, dans nos régions tempérées et septentrionales; il est partout le même, et bien différent de nous depuis près de 4000 ans.

Ce fait est caractéristique, et l'on est en droit d'en demander une explication plausible et aux défenseurs des transmutations animales tout comme aux défenseurs de l'unité de l'espèce. Le secret de la conservation de ce type est très-simple; une législation forte et originale, un caractère national énergique, en dépit de l'ubiquité de la race, a empêché les croisements qui peuvent seuls en réalité finir par donner des espèces nouvelles, là où les natures ne sont pas trop différentes pour en empêcher les résultats. Ce petit peuple assurément méritait autre chose que les persécutions que les chrétiens lui ont toujours prodiguées. S'il réfute une tradition et l'unité de l'espèce, il aide du moins à faire ressortir l'unité de la nature humaine en démontrant que nulle race ne peut devenir une autre race, et que l'homme ne sort pas plus d'un peu de fange que n'en sort l'oiseau mélodieux, la fleur aux couleurs étincelantes. La fraternité humaine, que l'on a par fois parodiée à force de vouloir la prouver, ressort de l'analogie de nature du principe animique dévolu à l'homme, et non d'une parenté d'individus réfutée par les faits, et parfaitement inutile au fond.

hauteur pour juger, nous pouvons être portés à croire que la vie de relation dérive d'un principe autre que la vie de nutrition, et que même quelques classes, très-nombreuses en individus, sont totalement privées du principe capable de se manifester avec la conscience de ses actes.

Au sommet de l'échelle nous trouvons l'homme, qui sait abstraire, qui sait remonter des effets aux causes, qui est en relations physiques, intellectuelles, idéales, avec l'Univers, *qui vit du pain de l'esprit*, et de celui du corps, et qui ne saurait pas plus être privé de l'un que de l'autre, sans cesser d'être lui.

Au bas de l'échelle, nous trouvons des êtres indéfinis de formes, ces phénomènes mystérieux que la chimie dispute à la botanique, que la botanique dispute à la zoologie, qui, placés aux confins de la vie organique, ont servi tour à tour à démontrer que tout vit, et que rien ne vit, et qui en tous cas, servent dans l'ordre réel comme dans l'ordre idéal, de lien de transition entre ce qui vit et ce qui ne vit pas.

L'observateur superficiel et non méthodique, qui se placerait à ces extrémités, pourrait à bon droit taxer d'insensé le philosophe hasardant cette opinion : qu'une *même classe de causes* détermine tous les phénomènes de la vie. Et c'est cependant là la conclusion à laquelle arrive tout observateur impartial des faits.

L'homme sait abstraire ; il sait chercher la causalité en toutes choses, et c'est un de ses besoins les plus élevés ; il sait s'assimiler en quelque sorte l'Univers, l'indéfini, l'infini ; il est tellement grand sous ce rapport qu'il est souvent arrivé à douter systématiquement de sa propre puissance, et que quelques doctrines se sont efforcées de l'humilier, de crainte qu'il ne se crût Dieu.

Il est certainement le seul être vivant qui soit doué de cette puissance. Mais, à moins d'admettre que nous avons chacun autant *d'âmes* qu'il y a d'objets sur lesquels s'exercent nos facultés, ce qui reviendrait au fond à n'en avoir aucune, nous sommes obligés de reconnaître promptement que la puissance, qui nous permet de remonter à l'abstraction, est la même que celle qui nous fait accom-

plir les actes les plus ordinaires de notre vie de relation; si c'est un principe spécial qui pense en nous, ce principe est un dans sa nature comme dans ses actes. Mais les animaux des classes supérieures éprouvent des impressions, ils sentent, ils délibèrent, et puis ils agissent après délibération, absolument comme nous. Dans tous les cas, *ils pensent comme nous.*

Si je m'adressais à ce que l'homme de science appelle à bon droit, et sans aucun esprit d'ironie, le vulgaire; si je m'adressais à cette majorité d'hommes qui, par leurs occupations journalières, par les conditions mêmes de leur vie sociale, sont maintenus dans un cercle d'idées restreint, duquel ils s'habituent à ne pas sortir, et qui par suite, quoique capables eux-mêmes d'observer et d'induire, aiment mieux accepter les observations et les opinions justes ou fausses d'autrui que de chercher et de penser directement, je serais tenu de donner encore aujourd'hui une démonstration d'autant plus étendue et plus précise de cette assertion, que les faits sur lesquels elle repose sont plus à la portée de l'observation journalière de chacun : car c'est sur ce qui est le plus à sa portée que l'homme ordinaire raisonne le moins et accepte le plus des opinions faussées presque toujours à dessein. Ici je n'ai pas à m'arrêter un instant sur cette assertion.

Le naturaliste, qui peut voir par ses propres yeux, est en général plutôt porté à s'exagérer la valeur de certains phénomènes intellectuels chez les animaux qu'à les diminuer, et l'on peut hardiment dire que ceux qui ont affirmé que l'homme seul pense, ou qui ont fait de l'animal une machine sans en faire une en même temps de l'homme, ne sont jamais sortis de leur cabinet, ou se sont tout au moins laissés égarer par des systèmes préconçus ou commandés par la prudence du jour. Je ne m'arrêterai donc qu'un moment sur un point essentiel qui nous permettra ensuite d'aller bien plus rapidement au but.

Ce qui a toujours le plus embarrassé les philosophes naturalistes qui se sont occupés des fonctions intellectuelles des animaux, c'est que si l'on admet le raisonnement chez ces êtres, on est promptement obligé *en apparence* de les croire supérieurs à l'homme ; on

a donc en général préféré dire qu'il n'y a chez eux aucune raison, et que tout s'accomplit suivant les lois fatales d'un mécanisme, à l'ensemble desquelles on a donné le nom d'instinct. Mais il y a ici à la fois exagération, méprise sur le sens des choses et fausse conclusion ; on a de nos jours très-bien débrouillé une partie de la difficulté, et quelques naturalistes ont montré très-clairement ce qui dans les actes de certains animaux est instinct, et ce qui est raisonnement ; ils ont montré que ce sont en général les œuvres de l'instinct qui pourraient au premier abord être tenues pour supérieures à celles de la réflexion humaine ; mais que ces œuvres sont fort loin d'être les seules qu'accomplisse l'animal même le plus inférieur. Il me semble cependant qu'il est un côté de la question que l'on n'a tout au moins pas assez fait ressortir encore.

Les actes instinctifs proprement dits, c'est-à-dire ceux que l'animal exécute de prime-abord, et sans aucun enseignement antérieur, font certainement partie en quelque sorte de son être, sous forme virtuelle ; qu'on admette dans ces êtres un principe animique ou non, on est, en toute hypothèse, bien obligé de reconnaître que le mode de ces actes est encore renfermé dans le secret même de l'organisme dans tout son ensemble.

Mais trois choses bien essentielles sont à observer ici : l'animal, tout en sachant à l'avance exécuter l'acte instinctif, est, du moins dans de certaines limites, libre de l'exécuter à tel ou tel moment : il l'exécute quand il voit que le moment le plus convenable est venu ; et là, nous le voyons se tromper quelquefois, d'autrefois deviner très-juste. Dans l'exécution de l'acte instinctif même, l'animal introduit pour la plupart du temps des modifications plus ou moins étendues que lui conseille la nécessité du lieu et du moment. Et de plus, collatéralement à l'acte instinctif, se trouve aussi fort souvent un complément que l'éducation vient y ajouter, et qui sert de perfectionnement à l'acte primitif.

L'hirondelle certainement émigre et sait où émigrer, par le fait de son instinct ; mais quand l'époque de l'émigration est arrivée, elle délibère (je dirais presque avec ses semblables) sur le moment

précis et opportun, et il lui arrive très-souvent de se tromper sur l'opportunité. L'abeille certainement exécute par instinct cette alvéole qui a fait comparer par quelques enthousiastes à un géomètre accompli ; mais tout en construisant par instinct, elle modifie selon les convenances du lieu son type primitif. Le chat, les tigres en général, savent chasser par instinct ; mille et mille ruses leur sont enseignées par le secret même de leur être ; mais il suffit d'avoir observé une seule fois une jeune famille de ces animaux, pour se convaincre qu'il y a là aussi une éducation. Le moule primitif enseigné par l'instinct est donc simplement, à proprement dire, une sorte de canevas sur lequel l'intelligence animale brode avec une liberté plus ou moins grande, avec un raisonnement plus ou moins développé, et avec une perfectibilité renfermée dans un cadre plus ou moins large. Mais ce qui visiblement y domine, c'est la *conscience*, la *connaissance* de l'acte exécuté. Or, si nous y regardons de près, nous reconnaissons promptement que c'est la conscience que nous avons de nous et de nos actions, qui constitue le côté saillant de notre activité, et que ce n'est nullement la puissance de cette activité, *très-variable d'un homme à l'autre*, que l'on peut prendre comme signe caractéristique. Quand on concéderait à l'orgueil de quelques-uns, qu'entre eux et l'animal il y a en effet un abîme, il n'en demeurerait pas moins certain que, si une âme est nécessaire pour expliquer la personnalité humaine, elle l'est aussi pour faire concevoir la personnalité de l'animal le plus inférieur.

Si nous poursuivons les phénomènes de la vie de relation à travers toutes les espèces animales, et si enfin du règne animal nous passons méthodiquement, et à l'aide d'observations générales, au règne végétal, où les phénomènes de relation, quoique beaucoup moins manifestes, quoique pour ainsi dire réduits à une forme *latente ou voilée*, ne peuvent pourtant pas être niés complètement, nous reconnaîtrons que nous n'avons nul motif scientifique pour refuser à un être vivant ce que nous serions forcés d'accorder à un autre, et nous arrivons à ce dilemme que l'on a maintes et maintes fois essayé d'éluder, quoique toujours en vain, et qui ressort triomphant de toutes les conquêtes de la science moderne.

Si un principe supérieur aux forces ordinaires de la nature est nécessaire pour expliquer les phénomènes de relation de l'être homme, un principe de même nature ne saurait être logiquement refusé à aucun autre être vivant. Et ce que nous refusons aux plus infimes de l'échelle organique, nous sommes obligés de le refuser à l'homme.

Nous avons supposé que l'on suive dans l'étude des êtres vivants une marche descendante. En suivant une marche ascendante et procédant d'ailleurs par gradation, comme les faits nous l'ordonnent, nous arrivons à un dilemme complètement parallèle au précédent, et au fond parfaitement identique.

Si un PRINCIPE de nature différente des forces ordinaires, un PRINCIPE différent de la SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE universelle est inutile pour expliquer les phénomènes de la vie de notre être, et du développement organique du dernier des végétaux, ce PRINCIPE est tout aussi inutile pour expliquer le même ordre de phénomènes dans les classes supérieures, dans l'homme. Et ici encore ce que nous accorderons à l'un doit l'être à tous.

Voyons d'abord dans quel sens se résout le premier dilemme. Nous trouverons ensuite une réponse au second; nous reconnaîtrons aisément si l'addition d'un principe vital à un principe animique n'est point une vaine et inutile superfétation.

Pour que nous puissions penser, ou du moins pour que nous puissions exercer notre faculté de penser avec suite, avec liaison, dans ses produits, il faut que non-seulement le cerveau, mais aussi tous les autres embranchements du système nerveux se trouvent dans un état d'intégrité normale à la constitution de l'ensemble de ces organes. Pendant que nous pensons, tout l'appareil nerveux se trouve mis en jeu, et ce n'est pas seulement *le cerveau qui travaille*, comme le dit d'une manière juste et expressive d'ailleurs le proverbe, mais tout l'être sensitif à la fois. Tantôt le foyer principal de l'activité semble se concentrer sur lui-même, et la sensibilité semble se retirer des extrémités. Tantôt il rayonne vers la périphérie; mille et mille *ouvriers emportent* sans cesse, prompts

comme l'éclair, et vont peindre sur les traits, sur la physionomie, le genre même des réflexions; puis renvoyés vers le centre, y rapportent des impressions de douleur et de plaisir qui semblent nés réellement dans les divers organes. Au bout d'un certain temps, dont la longueur dépend à la fois de l'intensité de la réflexion et de la capacité de l'appareil en jeu, la fatigue nait, devient de plus en plus intense; le sommeil réparateur, ou le repos, ou la diversion dans le cours des idées, deviennent bientôt indispensables. Que la cervelle et toutes ses dépendances soient nécessaires à l'exercice de la faculté de penser, c'est ce qui ne peut présenter aucun doute à tout esprit sérieux.

Mais résulte-t-il de là par hasard que ce soit la cervelle qui pense réellement au lieu de travailler simplement pendant que nous pensons, et par le fait de l'acte même de la pensée?

Un corps, quel qu'il soit, ne peut avoir que deux états, le repos ou le mouvement dans sa totalité; le repos ou le mouvement de ses parties internes et constituantes. Si c'est réellement le cerveau qui pense, la faculté de penser ne saurait dériver que d'un état statique d'équilibre entre la matière et la substance intermédiaire qui constitue le corps pensant, ou d'un état dynamique d'équilibre, soit dans la matière seule, soit dans la substance seule, soit enfin dans la masse corporelle entière. Mais un mouvement interne à un corps ne peut être que vibratoire s'il doit durer. Acceptons pour un moment cette hypothèse de *vibrations intelligentes*, qu'on a effectivement posée, et qui aurait le précieux avantage de peindre sous forme d'image, non seulement les actes de notre esprit, mais cet esprit lui-même dans sa nature intime.

Un mouvement vibratoire est essentiellement fini et limité de sa nature, dans quelque principe qu'il s'exerce. Si la faculté de penser, si l'être pensant est une collection de vibrations qui ne dure qu'autant que la vie, cet être évidemment ne peut produire que des choses analogues à lui dans sa nature, et toutes nos idées doivent être représentatives, figuratives, et finies aussi.

On pourrait croire, au premier abord, qu'il s'agit ici de purs jeux

de mots : nous avons comme témoin tout un siècle de philosophie; il nous suffit de rappeler que tous les penseurs logiques qui ont réduit la vie en général à un pur mécanisme, ont banni la notion de l'infini du cercle des choses sur lesquelles nous pouvons penser. Sans revenir de ce que j'ai déjà dit sur cette question, je ferai seulement observer que quand on a vu un des génies les plus puissants qu'ait produits l'humanité, échouer et aboutir à un non sens, en voulant faire découler le calcul différentiel de la notion ordinaire du fini (MONTFERRIER, DICTIONNAIRE DES MATHÉMATIQUES, RÉFUTATION DE LA THÉORIE DES FONCTIONS ANALYTIQUES DE LAGRANGE), nous pouvons désormais regarder comme du temps perdu, que de vouloir prouver que notre esprit peut s'exercer sur autre chose que le fini, et qu'il ne peut par suite, en aucune hypothèse, être attribué ou être interprété par une image finie.

L'hypothèse des mouvements vibratoires étant définitivement bannie du cercle des interprétations qu'on pourrait donner des phénomènes de la vie de relation, accepterons-nous l'hypothèse d'un état statique résultant d'une disposition particulière de la cervelle qui ressemblerait à une pile galvanique pouvant rester indéfiniment chargée et polarisée, et où le travail proprement dit, le mouvement, ne commence que quand la jonction des pôles a été opérée par un conducteur? — La faculté de penser serait alors la disposition elle-même de l'appareil galvanique. L'acte de la pensée et tous ses produits seraient les résultats du travail de la pile, de sa mise en activité. — Cette hypothèse, disons-le, est beaucoup plus élevée que la précédente. Comme idée représentative de la constitution de l'organe cérébral, il se peut qu'elle soit juste, ou tout au moins qu'elle soit en quelque sorte la clef d'une vérité que nous pouvons espérer confirmer tôt ou tard. Comme interprétation de nos actes intellectuels et de ceux de tout le règne des êtres vivants, elle est au moins plus en harmonie avec les conquêtes de la science moderne, et elle suppose du moins dans la substance intermédiaire une activité qui, sans aucun mouvement antérieur, est capable de tirer la matière de son repos ou de l'y faire rentrer. Dans une pile au repos, où il ne s'opère aucune réaction chimique, on ne saurait en effet contester une capacité préexistante et toujours prête à

agir. Nous pourrions à la vérité discuter sur la nature finie de toutes les vibrations, eussent-elles même lieu dans l'éther, et chercher comme ci-dessus, si elles représentent correctement tous les actes de notre esprit et tous les sujets sur lesquels il s'exerce. Mais il est une autre objection beaucoup plus capitale que nous devons faire à cette hypothèse et qui maintenant nous ramène droit à notre but.

En acceptant toujours la comparaison vraie ou seulement approximative de notre cervelle et de tout l'appareil nerveux avec une pile galvanique d'un genre particulier, nous concevons très-bien qu'une pareille pile puisse rester chargée et prête à agir ; mais ce qui demeure tout aussi clair pour nous, c'est que ce n'est point *par elle même* qu'une pareille pile peut commencer à agir ou cesser d'agir ; c'est qu'elle restera au repos tant qu'aucune impression venue du dehors ne la tirera de ce repos ; c'est qu'elle restera en activité indéfinie dès que son équilibre aura été troublé par une impression ou une autre. En supposant même qu'une pile résultant nécessairement de la superposition d'éléments symétriques multiples, puisse avoir la conscience une et indivisible d'elle-même, il est évident, en nous tenant dans le cercle expérimental, que cette pile ne pourrait jamais commencer à travailler, *à penser*, qu'après une impression externe ; mais qu'une fois cette impression reçue, elle ne pourra pas ne pas travailler, *ne pas penser*. Or cette faculté spéciale de tout être pensant n'a jamais pu être niée que systématiquement, et contrairement à l'observation la plus élémentaire des faits. — Nous pouvons, et nous devons donc admettre logiquement que la pile vivante est gouvernée par un principe spécial de nature totalement distincte de tous les éléments de la pile elle-même, absolument comme nous avons été conduits à reconnaître que dans la nature, il existe une ou plusieurs substances capables d'activité.

Acceptons provisoirement cette hypothèse d'un PRINCIPE ANIMIQUE comme une nécessité, c'est-à-dire comme une affirmation qui ne subsiste que par ce que nous n'en trouvons aucune autre à mettre à sa place, et assignons à ce principe les propriétés que l'observation des faits nous force à lui reconnaître, si nous ne voulons le détruire.

Au premier abord, le SENS DU TOUCHER semble être répandu partout dans notre système corporel : toutes ou du moins presque toutes les parties de notre corps sont capables de nous faire éprouver des impressions locales.

L'analyse anatomique montre cependant que les rapports des principes ne s'établissent qu'à l'aide d'un appareil admirable de délicatesse et de perfection, qui se ramifie jusque dans les dernières sections du corps. — Là, où un faisceau nerveux manque, il n'y a plus ni sensation, ni motilité. — Lorsque la communication entre le foyer cérébral est interrompue ou seulement gênée, la sensation et le mouvement deviennent ou nuls, ou faux. — A chaque impression, que nous recevons du dehors ou du dedans, un courrier prompt comme l'éclair part du lieu impressionné, et se rend au foyer commun ; la sensation n'a lieu qu'à cette condition.

Avant tout acte physique, avant toute pensée, il est en nous une puissance qui peut, en temps et lieu, commander ces deux genres d'actes, les déterminer ou non, et qui sait qu'elle le peut, qu'elle en est libre, et qui de plus sait *qu'elle est*.

Je ne suis aucunement libre de ne pas éprouver les impressions que me transmettent mes sens ; je ne suis pas libre de sentir ou non ; mais lorsque j'ai reçu un certain nombre d'impressions, je puis à volonté les combiner, les peser et les comparer ; je délibère, et après avoir délibéré je veux ou je ne veux pas mouvoir mon corps, ou l'un de mes membres, je veux ou je ne veux pas agir, et ce n'est qu'après ma décision que l'action commence. On a essayé de soutenir maintes et maintes fois que nous ne pouvons pas ne pas agir. Cela n'est vrai que pour ce qui concerne tous nos actes physiques ou corporels, qui touchent à la *vie de nutrition*, et par suite à la conservation de notre être. Nous ne pouvons pas à volonté ne pas digérer, ne pas laisser battre notre cœur, ne pas respirer, car nous péririons bien promptement si ces actes étaient soumis à notre pouvoir *direct*. Mais cela est complètement faux pour tout ce qui concerne les actes qui découlent de nos relations avec les autres êtres. Non-seulement nous pouvons ne pas nous mouvoir corporellement,

mais nous pouvons ne pas penser, du moins dans de certaines limites : nous pouvons parfaitement ne pas délibérer sur les impressions qui nous arrivent, malgré nous, du dehors, et nous pouvons surtout ne pas délibérer, ne pas analyser les produits rudimentaires de nos premières réflexions presque instinctives.

L'intensité de l'acte de penser varie d'un homme à l'autre, et dans un même homme d'un moment à l'autre. Il est beaucoup d'hommes qui évitent, et après expérience, de donner trop d'énergie à l'exercice de cette fonction ; il en est aussi qui préfèrent, aussi souvent qu'ils le peuvent, vivre de pures impressions, rêvasser et dormir en quelque sorte éveillés, et qui, quand ils ont vécu de la sorte un certain temps, deviennent réellement incapables d'aucune méditation sérieuse.

Résulte-t-il de là que l'être homme soit chez eux passif? Eh! non ; mais son activité ne s'exerce que du côté des fonctions de nutrition qui ne dépendent (heureusement pour la conservation de ces hommes) aucunement d'un acte raisonné et délibéré de la faculté de penser. A chaque mouvement, volontaire ou non, qu'exécute une partie quelconque du corps, un courrier prompt comme l'éclair part du foyer commun, ou tout au moins des foyers partiels, avec lesquels il se trouve sans cesse en relation : le mouvement n'a lieu que sous cette condition formelle.

Quelle est la nature de ce courrier? Elle ne peut assurément être une vibration des molécules matérielles, car s'il en était ainsi toute vibration analogue devrait nous arriver du dehors à l'organe de l'ouïe, destiné spécialement à nous mettre en rapport avec les vibrations de la matière, deviendrait parfaitement inutile. Ce courrier prompt comme l'éclair est un mouvement vibratoire de la SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE, une ou multiple, où se manifeste effectivement l'éclair (¹). Si nous y regardons de près et attentivement, nous ver-

(¹) Les expériences de M. Du Bois-Reymond mettent hors de doute que c'est l'électricité qui est l'agent qu'on nommait jusqu'ici le fluide nerveux.

rons qu'il n'est pas une seule de nos relations avec le monde externe, pas une relation des parties internes de notre corps qui ait lieu directement. Et nous pouvons poser cette première affirmation qui résume l'une de ces qualités les plus saillantes : LE PRINCIPE ANIMIQUE *n'a nulle prise immédiate sur* LA MATIÈRE ; *il lui commande ou il est commandé par elle ; il est en un mot en relations réciproques avec elle par la présence d'une* SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE.

Cette proposition, qui au fond repose tellement sur l'observation analytique des faits qu'elle n'en est que la traduction, caractérise nettement la nature du principe animique. Il est en rapport permanent avec les principes constituants du monde physique ; le corps qui lui sert de lieu ne s'organise, ne prend forme qu'avec ces principes. Le principe animique est par suite doué de propriétés réciproques et symétriques qui permettent ces rapports ; il peut et doit dès lors être considéré et étudié comme nous étudions tous les autres éléments constitutifs de l'Univers. Et il n'est mis à même d'agir que par ses rapports directs avec la substance intermédiaire universelle. Il est donc à celle-ci ce qu'elle est elle même à la matière. Quoique substance, et quoique doué comme telle de propriétés en quelque sorte physiques (dont en toute hypothèse on essaierait en vain de le spolier sans le faire sortir de la réalité des faits), il est aussi supérieur à la subsistance intermédiaire que celle-ci l'est à la matière. Car non seulement il agit comme celle-ci, mais il sait qu'il agit, et dans de certaines limites déterminées par les nécessités de son existence organique, il est libre d'agir ou non.

Mais de cette réciprocité de relation permanente qui existe dans l'être organique entre les principes qui le constituent, il résulte qu'il n'est pas un seul acte physique, organique, mécanique, intellectuel, que nous puissions, sans déraison, abstraire. Il est tout aussi absurde de bâtir de toutes pièces un homme tout intelligence, qu'un homme tout corps. Il n'est ni l'un ni l'autre isolément, mais il est tout à la fois, c'est-à-dire que l'instrument et ce qui dirige l'instrument sont dans un état harmonieux de relation qu'il n'est pas possible de scinder sans sortir complètement du cercle expérimen-

tal. Ce n'est certainement pas le PRINCIPE ANIMIQUE qui digère en nous, comme quelques-uns l'ont dit : mais la digestion, suite de réactions, de combinations et de décompositions chimiques analogues en tout à celles du monde physique, est dirigée par la puissance organisatrice du principe sans lequel le corps vivant n'est plus qu'un corps ordinaire.

Le système *nerveux ganglionnaire* est spécialement chargé des plénomènes de la vie de nutrition, qui semble en quelque sorte une puissance passive ou du moins indépendante de ce que nous nommons la volonté; mais les ganglions, ou centres directeurs des actes non volontaires, sont eux-mêmes sous la dépendance du foyer commun; ils cessent de fonctionner dès que la communication est rompue; ce sont (si l'on veut poursuivre une comparaison qui n'a peut-être que le tort d'être prématurée, et très-incomplète par suite) autant de *piles secondaires* qui n'acquièrent de valeur et de puissance que sous l'action rectrice et directrice d'une pile générale.

Il n'est pas de mouvement interne ou externe, d'évolution organique, si minime qu'elle soit, qui puisse se détacher de fait de l'action régulatrice générale.

Les passions de l'âme (pour me servir ici du langage ordinaire) se peignent instantanément sur la physionomie, dans la contenance de l'individu, et ceci est vrai de l'animal supérieur comme de l'homme. Et lorsqu'une même passion règne longtemps immodérée chez l'individu, elle finit en quelque sorte par pétrir la physionomie sur son moule idéal. Sans parler des émotions passagères, qui presque toujours se lisent clairement au dehors, maintes et maintes fois nous jugeons correctement du caractère de l'homme et de l'animal, d'après les formes externes qu'ils affectent.

Je me suis servi déjà du mot *puissance organisatrice*. Il est caractéristique: si l'on contestait *à priori* cette puissance au principe animique; si l'on soutenait *à priori* que les formes de l'être vivant, et par contre-coup les fonctions organiques, quelles qu'elles soient de cet être, ne dérivent pas d'une activité incessante de ce principe, l'existence d'un tel principe deviendrait parfaitement inutile, et il ne

serait pas difficile de démontrer que le corps qui aurait su s'organiser lui-même saurait aussi penser.

La *puissance organisatrice* que nous sommes obligés de supposer au PRINCIPE ANIMIQUE, sous peine, non de le détruire, car, Dieu merci, nos discussions n'y peuvent rien, mais sous peine de rendre ce principe parfaitement inutile dans nos interprétations; cette puissance, dis-je, nous permet de résoudre presque directement un problème autrement des plus difficiles. N'existe-t-il qu'une seule substance animique, modifiée à l'infini d'une espèce d'êtres vivants à une autre, d'un individu à un autre? Ou existe-t-il autant de principes différents qu'il y a d'espèces et d'individus? Nous pouvons bien, par une suite d'observations exactes et de raisonnements consécutifs, reconnaître que ce qui anime l'homme est analogue en nature à ce qui anime la plante; nous pouvons bien encore, en examinant deux individus d'une même espèce, arriver à leur reconnaître des qualités telles, qu'ils nous paraissent en réalité identiques.

Mais il nous est impossible de confondre l'ensemble des fonctions humaines, non seulement avec celui des fonctions d'une plante, mais encore avec l'ensemble des fonctions de l'animal le plus voisin de nous. Mais nous ne pouvons non plus arriver à croire que deux individus, fussent-ils d'ailleurs semblables, ce qui n'a jamais eu lieu depuis l'origine des êtres, ne fassent qu'un; chaque individu est un, tant qu'il vit, et toutes les fonctions de ses organes aspirent sans cesse à maintenir cette unité. Chez l'homme, le sentiment de l'unité est tellement incrusté et énergique qu'il devient en quelque sorte le pivot de tous ses actes. Et la botanique aura beau prouver que la plante est partout identique à elle-même, et formée d'autant de plantes semblables que nous pouvons en détacher de parties, puisque toutes ces parties repoussent et forment de nouveaux sujets : il n'en demeure pas moins vrai qu'actuellement les parties d'un arbre ne peuvent à aucun titre être confondues, et qu'elles forment entre elles l'unité harmonieuse qui est l'arbre vivant. La divisibilité de la plante et de certains animaux prouve simplement que le principe animique est diffus dans toutes les parties de l'être au lieu d'être

centralisé. Nous aurons à revenir sur cette question, qui est importante.

Si c'est la SUBSTANCE ANIMIQUE répartie à chaque être vivant qui organise cet être, qui lui donne ses formes internes et externes actuelles, en appelant à elle les principes du milieu ambiant et en les arrangeant entre eux par l'action directrice qu'elle exerce à l'aide de la substance intermédiaire, il est bien évident qu'il doit exister autant de substances animiques différentes qu'il y a d'espèces, puisque ce n'est plus qu'une différence spécifique dans ces substances qui peut alors expliquer la diversité des manifestations.

Il est de plus évident, qu'*au moins actuellement*, la substance animique ne peut être considérée comme un principe universellement répandu, mais qu'il se constitue en unité indivise dans chaque individu,

L'hypothèse d'une SUBSTANCE ANIMIQUE, renfermant en elle toute la virtualité des fonctions que remplit l'être qu'elle rend vivant, nous apparait comme vraie à la suite d'une analyse et d'une synthèse simultanées des fontions de l'être, et nous aide ensuite à expliquer logiquement un certain nombre de faits très-importants. Mais, par contre-coup, dans ces faits qu'elle explique, elle trouve une vérification nouvelle de sa propre justesse.

La constitution organique, la construction du mécanisme de chaque individu est toujours et partout tellement en harmonie avec les fonctions, avec les manifestations externes de cet individu comme unité vitale, que l'on ne sait, au premier abord, si c'est l'âme qui pétrit le corps, ou si c'est le corps qui façonne l'âme (pour me servir d'une expression vulgaire).

Au fond, les deux faits énoncés par cette sentence interrogatoire, sont toujours simultanés, bien que l'un domine étrangement l'autre.

Le corps d'un être vivant peut être considéré comme l'instrument à l'aide duquel sa substance animique se manifeste et crée tout l'ensemble de ses fonctions.

Mais ce corps est formé des éléments du milieu ambiant, et par ce fait même qu'il est instrument, il est sans cesse en rapport avec toutes les forces du monde externe. Pour que la substance animique puisse organiser, il faut donc qu'elle trouve autour d'elle les éléments nécessaires à la composition chimique et à la forme générale de chaque organe. Si elle ne les trouve pas, l'être vivant souffre, dégénère, et toutes ses manifestations normales sont faussées. Si cette dégénérescence, étudiée dans la réalité des faits, devenait jamais indéfinie, si une espèce pouvait devenir une autre espèce, le problème que nous cherchons serait résolu d'une manière parfaitement déterminée. Mais ce n'est pas en ce sens que les faits prononcent. Le type d'une espèce peut osciller entre de certaines limites, et il les atteint même beaucoup plus vite qu'on ne pourrait le penser d'abord. Privez l'homme d'air, d'une alimentation convenable, etc., et au bout de quelques générations, ce maître orgueilleux de la nature devient un crétin, un être bien inférieur en fonctions à certains animaux. Mais ce crétin n'est pas un animal d'une autre espèce; rendez-lui tous les éléments que réclame son organisme, et au bout de peu de temps il redevient un homme ordinaire.

Dans l'hypothèse d'une puissance organisatrice [illegible] la matière elle-même ou de la matière et de la substance intermédiaire, l'intransmutabilité des types proprement dits devient inexplicable : on [illegible], jamais [illegible] qu'une fois altéré, [illegible] puisse revenir à [illegible] forme primitive, [illegible] qu'il n'existe [illegible] cause primitive [illegible] temporairement [illegible] dans ses fonctions.

L'intransmutabilité des espèces vivantes, comme celle des éléments chimiques, prouve l'existence de ces espèces, et prouve en même temps la réalité d'une de leurs qualités les plus saillantes : *la puissance organisatrice,* par laquelle elles pétrissent en quelque sorte elles-mêmes l'instrument à l'aide duquel elles se manifestent.

La vie n'est donc point, et ne peut à aucun titre être regardée comme un ensemble de fonctions ; elle n'est pas non plus un ensemble de mouvements nécessaires. Mais nous ne pouvons dire d'un être vivant ce qui est même faux pour une machine : une horloge

n'est point un ensemble de fonctions, et elle ne résulte pas d'un tel ensemble. Elle *accomplit* des fonctions toutes liées les unes aux autres et en harmonie parfaite; elle les accomplit à l'aide des substances qui les composent, à l'aide des formes organiques qu'affectent ces substances, et à l'aide du mouvement dont ces formes sont capables. L'horloge peut marcher ou non, mais tant qu'elle s'appelle horloge elle renferme en elle un principe moteur; donc aucun mouvement antérieur ne peut expliquer l'activité; et tant que l'horloge marche, elle est, dans toutes ses fonctions, la manifestation de la puissance de ce principe naturel. L'être vivant diffère de ce mécanisme en ce qu'il construit, de lui-même et par sa virtualité propre, l'organisme nécessaire à l'accomplissement de ses fonctions; il en diffère encore en ce que les mouvements, qui dans l'horloge n'affectent que les formes organiques, affectent en lui les formes et les éléments internes qui constituent ces formes; nos membres, par exemple, ne se meuvent pas seulement dans leur totalité; à chaque contraction musculaire il s'opère des décompositions et des recompositions chimiques internes, des mouvements partiels dans toutes les parties constituantes; aucun des éléments que l'être vivant appelle à lui n'y reste, ils ne font que le traverser avec leur activité spéciale et sont rejetés bientôt [illegible]

Chaque être vivant forme un tout harmonique qui, dans son ensemble et sa construction comme un mécanisme, un instrument, accomplit un ensemble de fonctions multiples qui le caractérisent, qui constituent son originalité, qui en font un individu; cela est vrai depuis l'homme jusqu'aux derniers des cryptogames. La vie est donc la manifestation de la substance animique qui, par l'ensemble de ses propriétés et de ses corrélations avec les autres principes constituants de l'Univers, agit dans l'être vivant comme puissance rectrice et directrice des éléments dont il se sert pour organiser le corps de l'être.

Chaque être forme un tout harmonieux où l'ensemble des fonctions à accomplir est toujours en corrélation parfaite, non seulement avec les moyens employés dans l'être lui-même pour les accomplir, mais encore avec le milieu ambiant où vit cet être. Le finaliste dit que l'oiseau a été doté d'ailes pour voler, et que l'air est là pour

qu'il puisse voler. Le fataliste dit que l'oiseau vole parce qu'il a des ailes, et que l'air est là qui le soutient. Il semble au premier abord que le rationaliste ne puisse pas même aborder la question résolue de deux manières si opposées, sans sortir complètement du cercle de l'expérience. Il est cependant facile de voir que, de ces deux solutions, l'une est radicalement fausse, et que l'autre, par son caractère exclusif, sort des faits. L'air et l'aile sont bien loin d'être les seules conditions du vol. Le vol suppose une organisation complète disposée *ad hoc*. Cette organisation suppose une puissance antérieure à elle, et capable de l'exécuter sans hésitation, sans tâtonnements ; le moindre doute dans l'accomplissement de l'œuvre organique serait la mort de cette œuvre. Aussi n'y a-t-il jamais ni doute ni tâtonnement : toute la virtualité, tout l'avenir de l'oiseau se trouve déjà dans ce germe microscopique agglutiné au sein d'un réseau imbibé d'albumine qui forme l'œuf. Si, comme on a voulu le soutenir, la nature tâtonnait, s'essayait, expérimentait, nous devrions bien, de temps à autre, trouver quelques *ébauches* d'espèces, quelques enfants mort-nés. Or, à toutes les époques géologiques, les êtres vivants ont été ce qu'*ils pouvaient* être, et *tout* ce qu'ils pouvaient être ; ils ont toujours été en harmonie parfaite avec le milieu ambiant. Entre le milieu et l'être vivant qui existe dans ce milieu, il y a une corrélation intime, et l'être vivant serait évidemment impossible sans ce milieu. Mais la puissance qui sans hésitation organise chaque être comme il doit et comme il peut l'être, suppose une substance animique *ad hoc* dans chaque être, comme elle suppose un but d'harmonie antérieur à toute manifestation de la vie.

La vie *organique*, considérée collectivement, est la somme de toutes les manifestations possibles de la substance animique considérée collectivement aussi, et alors une dans sa nature. Mais nous disons que cette substance est multiple, qu'elle est formée d'éléments divers doués de qualités spécifiques, car la diversité des phénomènes et la persistance de chaque phénomène divers ne peut se concevoir rationnellement qu'à l'aide de la diversité des substances qui donnent lieu à ces phénomènes.

Mais, dira-t-on, la multiplicité des espèces de substance et l'unité

de l'individu supposent que la substance animique est limitée dans l'être et qu'elle est finie : elle est donc analogue sinon identique à la matière. Quel est alors le siége de cette substance? Dans l'homme, la personnalité de l'individu, la conscience qu'il a de lui-même peut faire croire qu'elle est une. Mais que devient alors cette unité dans la plante et même dans certains animaux qui sont divisibles?

A ces questions pressantes, il est plus facile qu'on ne le pense, de répondre.

Sans chercher à résoudre dans cet exposé sommaire le problème de la constitution interne de la matière comme forme; sans chercher si elle est divisible à l'infini, ou constituée en atomes finis indivisibles, nous avons reconnu que tout au moins, quand elle est concentrée par l'activité des forces, elle est essentiellement finie et limitée dans l'espace. Nous avons reconnu à la substance intermédiaire un caractère précisément inverse : elle est universelle et indéfinie de forme, toute idée même *de forme* qu'on y attache la détruit dans notre pensée. La SUBSTANCE animique est certainement renfermée dans l'organisme de l'être vivant : elle ne peut se manifester extérieurement ni rien savoir de l'extérieur sans l'instrument qui lui est dévolu. Tout ce que l'être vivant sait du monde externe, lui vient de la périphérie au centre : il semble donc que l'essence animique est de nature limitée. Mais une fois une impression reçue, cette essence l'élabore, délibère et puis *agit* ou *n'agit pas* (car dans des limites infiniment rapprochées, la liberté ne peut pas même être contestée à la plante). Cette partie de son activité est en lui et ne peut être périphérique, et cependant, tant qu'elle s'exerce, tout l'être organique éprouve les manifestations de cette activité : *il travaille*. Toute idée de localisation précise dans le foyer commun de perception devient ici inadmissible. Quand il serait prouvé que dans la cervelle des vertébrés se trouve un point géométrique qui ne peut être lésé sans que la mort de l'intelligence ne s'en suive, il n'en résulterait pas que la substance animique fût là. La puissance qu'a ce principe, dans les êtres supérieurs, d'élaborer une impression par son activité propre, *de la digérer* en quelque sorte; la puissance qu'a surtout l'être *homme* de s'assimiler, pour ainsi dire, la nature de

l'abstrait et de l'infini, cette puissance est inconciliable avec toute idée de forme définie et finie. Toutes les fois qu'on voudra *figurer* le principe animique, on le détruira dans son essence, et l'on niera une collection toute entière de faits ; absolument comme on détruira et comme on niera une autre collection de faits, toutes les fois qu'on voudra le dégager des qualités et des propriétés de SUBSTANCE qui lui sont inhérentes. Chez les êtres supérieurs, la SUBSTANCE ANIMIQUE constitue une UNITÉ ACTIVE, à laquelle l'idée de divisibilité ou d'indivisibilité ne peut s'appliquer sans un contre-sens par trop manifeste.

Nous disons que toute idée de localisation géométrique est inadmissible relativement à l'unité animique. Et cependant les travaux expérimentaux de l'un de nos plus grands physiologistes démontrent positivement que chez les vertébrés : 1° l'intelligence siége dans le cerveau proprement dit ; 2° la vie, dans la moëlle allongée ; 3° la sensibilité dans les faisceaux postérieurs de la moëlle épinière et des nerfs ; 4° la motricité, dans les faisceaux antérieurs ; 5° la coordination des mouvements de locomotion dans le cervelet.

Il semble qu'ici l'expérience dément non-seulement la proposition précédente, mais encore la plupart des vues générales présentées antérieurement. Si ce démenti est réel, toutes ces vues sont fausses, n'hésitons pas à le dire. Les faits que M. Flourens a conquis à la physiologie ne sont point de ceux dont on négligerait impunément de tenir compte ; ils s'imposent désormais comme une épreuve définitive de la justesse de toute doctrine biologique. Mais ces faits conduisent à deux genres de conclusions différentes, qui s'excluent réciproquement, qui se posent comme les termes d'un dilemme entre lesquels il faut opter.

On peut en conclure que l'intelligence, la vie, la sensibilité, la motricité, la coordination des mouvements, sont dues à des essences naturelles distinctes, et ayant chacune un siége à part. (Nous évitons à dessein l'usage du mot FORCES, parce que ce que nous avons dit à ce sujet (page 76) demeure vrai en toute hypothèse.)

On peut dire aussi que le PRINCIPE ANIMIQUE est seul nécessaire pour déterminer les différences qui distinguent l'être vivant des

corps ordinaires, mais que ce principe, appelé à plusieurs fonctions distinctes, a besoin d'appareils spéciaux pour les accomplir.

La première conclusion est en contradiction implicite avec chaque ligne des pages précédentes. La seconde au contraire, non-seulement ne présente nulle contradiction, mais n'est même, à vrai dire, qu'une condensation nouvelle de tout ce que nous avons vu découler de l'observation aussi. Nous pourrions à la rigueur ne pas nous arrêter davantage sur la conclusion contradictoire. Mais les termes de notre dilemme renferment plusieurs propositions de valeurs très-inégales : deux d'entre elles dominent singulièrement les autres ; elles constituent ensemble un problème que les expériences de M. Flourens ont défini et limité plus nettement qu'il ne l'était jusqu'ici, mais qui, antérieurement déjà, a occupé les plus grands esprits. Il serait imprudent de se borner à le résoudre implicitement et sans l'aborder de front. Plaçons-le de suite à toute sa hauteur. M. Flourens a disséqué l'animal avec le fer; étendons ses admirables découvertes à l'homme, et disséquons-le par le raisonnement. Qui peut le plus peut le moins, dit le proverbe : ce qui sera acceptable, même pour l'homme, sera évident pour tous les êtres vivants.

La vie et l'ame sont-elles des principes distincts, ou la vie n'est-elle que l'une des manifestations de l'âme ?

En un sens, la première de ces questions ne supporte pas même un instant d'examen et c'est la seconde seule, et bien exclusivement, qui comporte une réponse affirmative. Pour nous tous indistinctivement, l'un des attributs les plus essentiels de l'âme, c'est de *vivre*. Nous *sommes*, nous *agissons*, et nous *savons* que nous *sommes*, que nous *agissons* : voilà ce qui pour nous constitue notre vie animique. C'est en ce sens que nous disons : la *vie future* ; c'est en ce sens que nous disons : le *Dieu vivant*. Et nous disons bien.

Mais remarquons-le, ce n'est point en ce sens purement *psychique* qu'est posée notre double question. Lorsque l'homme de science, lorsque le physiologiste prononce le mot de vie, il s'y attache implicitement pour lui une qualité tellement inhérente, qu'il ne la mentionne pas même à l'aide de l'adjectif nécessaire. Pour lui, LA VIE

n'est pas trop en droit de soutenir que l'un est réellement inférieur à l'autre, quelque flatteuse que soit pour l'orgueil humain l'affirmation contraire. Mais ce que l'on ne saurait contester sans aller droit contre les faits, c'est que l'amplitude des fonctions varie énormément d'une espèce à l'autre. La centralisation de l'appareil nerveux en un foyer cérébral, diminue pour ainsi dire d'intensité d'une espèce à l'autre. La puissance organisatrice de l'être semble croître en raison inverse du nombre des fonctions de relation : dans l'être qui ne sait éviter le mal, la substance animique est douée d'une plus grande puissance de réparer le mal. Là où le centre cérébral manque, et seulement là, l'être devient *divisible* en un certain nombre de parties. Là où il n'y a plus d'apparence de système nerveux, l'être devient plus divisible encore. Ce n'est pas, comme on l'a dit, la vie qui est divisible, c'est l'organisme vivifié dont chaque partie constitue un être à part, appelé par sa juxta-position et ses corrélations harmoniques avec un autre être, à former une totalité qui pour nous constitue l'individu. — Ce que la SUBSTANCE ANIMIQUE ne peut plus faire par ses qualités propres, est atteint ici en quelque sorte par le nombre des unités que représente réellement l'être.

L'analyse et la discussion des phénomènes du monde physique nous ont conduits à admettre l'existence de deux classes de principes constituants très-différents de nature, auxquels nous avons donné les noms collectifs de MATIÈRE, et de SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE. La matière forme *la partie finie* des corps; elle est confinée, délimitée dans l'espace par *l'activité* de la substance intermédiaire qui se manifeste à la fois comme FORCE et comme AGENT DE RELATION entre les corps distincts, ou entre les parties matérielles du même corps. La substance au contraire indéfinie existe pure dans les espaces stellaires.

Nous avons été amené à dire que la MATIÈRE se subdivise en espèces, en individus immuablement distincts, et qu'il en est probablement de même de la SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE.

L'analyse et la discussion des phénomènes nous conduisent à reconnaître, dans le monde des êtres vivants, une classe de principes

Eh ! bien, ce principe ne peut rien par lui seul, pour se mettre en rapport de *connaissance* avec les autres êtres même semblables à celui qu'il constitue, il lui faut la présence et l'aide de la matière, de la SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE ; il lui faut un corps, et non point un corps ordinaire formé de parties matérielles assemblées au hasard par l'action de la force, mais un corps qui constitue un ensemble admirable d'instruments les plus divers ; sans ce corps, et sans l'organisation tout-à-fait spéciale de ce corps, elle ne peut rien ici-bas : elle ne peut pas même penser ! Elle est donc, comme les autres classes de principes, comme la MATIÈRE, comme la SUBSTANCE INTERMÉDIAIRE, douée réellement de *propriétés physiques* qui établissent sans cesse ses rapports nécessaires avec l'instrument à l'aide duquel elle accomplit toutes ses fonctions.

Mais, malgré cette union à un corps, à cause de cette union même, elle affecte encore un caractère transcendant comme simple élément de l'Univers. En effet, dans l'instrument qui lui est indispensable, qui, sous l'empire de la volonté, va commander les mouvements de nos muscles, c'est un impondérable qui nous transmet, comme autant de dépêches télégraphiques, les impressions des phénomènes externes sur notre corps. De plus cet impondérable, pour servir d'agent de sensation, de mouvement, a besoin d'appareils particuliers qui, par ce fait même qu'ils semblent localiser la puissance de l'âme, placent celle-ci en dehors des conditions de lieu, telles que les comprend le langage ordinaire.

Il répugne à beaucoup de personnes d'admettre que l'âme *organise* elle-même cet instrument dont pourtant elle ne peut se passer ; qu'elle fasse croître le corps ; qu'elle concoure à tous les phénomènes intérieurs, jusqu'à cet impur acte de la digestion stomachale ! D'un autre côté, il leur répugne d'admettre qu'en vertu de propriétés spécifiques dont elle n'a *nulle connaissance*, l'âme agisse, et produise quoi que ce soit sans le *savoir*. Il leur semble donc nécessaire d'imaginer un principe à part qui commande uniquement l'organisation du corps.

Remarquons cependant d'abord que puisqu'un instrument est nécessaire à l'âme, non seulement pour se mettre en rapport avec

le monde externe, mais même pour accomplir sa fonction la plus sublime, pour penser, rien de ce qui est nécessaire à la construction de cet instrument ne saurait être appelé vil et impur par un homme de sens. Sans la nutrition, la cervelle serait impossible : la nutrition ne peut donc être placée à un rang plus infime que l'ensemble de l'appareil admirable qu'elle forme et maintient. Il est certes absurde de dire que *l'âme digère ;* il l'est tout autant de dire que *le cerveau pense.* Il n'est ni absurde ni répugnant de dire qu'elle dirige, par la puissance virtuelle qui est en elle, tous les phénomènes nécessaires à la conservation de l'ensemble organique dont elle se sert.

Tout ce qui est relatif à la vie de nutrition échappe, il est vrai, à la connaissance directe de l'âme : et cela est fort heureux ! Cependant cette réaction tacite de l'âme sur le corps n'est pas tellement occulte que nous ne puissions fort souvent apercevoir les rapports de la cause à l'effet. A l'état de calme, notre cœur bat régulièrement, et nous pouvons presque croire qu'il bat de lui-même : le souffle d'une passion vient-il cependant à traverser l'âme, et aussitôt il accélère ou ralentit ; nous ne savons non plus comment cela se fait, mais le fait est là, et souvent fort pénible. Nos cheveux croissent sur notre tête à notre insu, et comme sous l'empire d'une force étrangère à nous : qu'un violent chagrin vienne cependant à troubler l'âme, et souvent ils tombent ou deviennent gris, en une seule nuit. Il y a donc entre les plus minimes parties de notre corps et l'âme un état perpétuel de relation, et il n'est ni plus répugnant ni plus difficile d'admettre que ces relations déterminent tout ce qui est nécessaire à la conservation de l'instrument, qu'il ne l'est d'admettre que ces relations ne puissent que troubler l'intégrité de l'organisme.

Si, en matière de science, il y avait lieu de s'arrêter à des répugnances au lieu d'aller aux faits, nous dirions que ce qui est réellement répugnant, c'est d'admettre qu'une force, purement physique désormais, qu'on nommerait la vie, *sache* construire un ensemble d'instruments tellement admirable que l'âme intellectuelle, armée de tous les moyens d'investigation que la science met au-

jourd'hui à son service, n'est pas même parvenue encore à le *connaître* dans toutes les perfections de ses détails : elle qui est destinée à *savoir*, et qui a souvent même la prétention de savoir sans apprendre ? Mais la réfutation d'une répugnance, pas plus que l'affirmation d'une autre répugnance contraire, ne peuvent servir ici de preuve définitive.

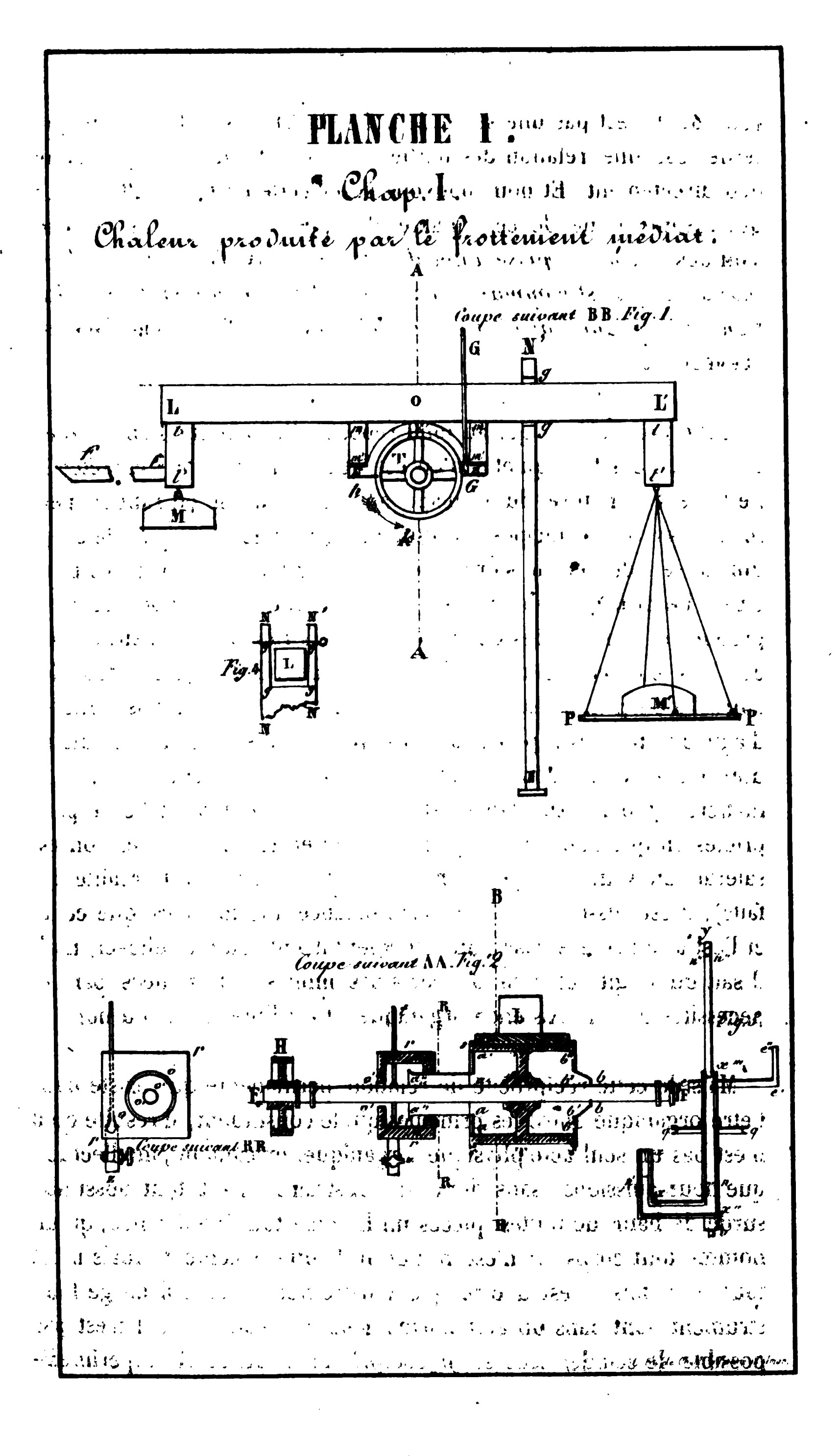
Le caractère de l'unité *partielle* ressort admirablement des données expérimentales de la physiologie et des vivisections. L'intelligence est *une*, et elle a son appareil spécial ; la sensibilité est *une*, et elle a son appareil spécial : il en est ainsi de la motricité, de la coordination des mouvements. Mais le corps humain, pas plus que le corps de tout autre vertébré, ne constitue une sorte de *mosaïque* aux formes partielles raides et arrêtées. Il est lui-même une admirable unité, où tout s'harmonise, où tout est en rapport manifeste avec le but à accomplir. Cette unité, qu'il n'est pas possible de méconnaître sans un contre-sens frappant, nous impose l'idée de l'unité quant au principe naturel auquel le corps est destiné à servir d'instrument. Chez l'homme, la fonction prédominante en vue de laquelle le corps semble construit, est d'une nature transcendante ; c'est la pensée, sous toutes ses formes ; une unité transcendante a donc seule pu organiser cet instrument qui porte son empreinte dans ses plus minimes détails. Chez l'animal, certes, la fonction transcendante ne prédomine point autant, et devient collatérale à d'autres fonctions plus inférieures ; mais elle ne saurait pour cela être absolument méconnue chez les derniers d'entre eux.

Et en résumé, il n'est pas plus possible à un point de vue purement physiologique, de concevoir une vie organique, *non animique*, qu'il n'est possible, à un point de vue purement psychologique, de concevoir une âme sans *puissance organisatrice* ou même de concevoir une *âme non vivante*.

Cette conclusion, non seulement n'est donc point en opposition avec les faits physiologiques, avec l'expérience ; mais, ne craignons point de le dire, elle est la glorification de la science expérimentale.

Chaque être de l'Univers est ce qu'il *peut et doit être*,

sciences d'observation, est donc pour le moment la seule de nos trois doctrines qui à la fois soit acceptée et imposée, et qui puisse recevoir le nom de rationnelle.


PLANCHE I.
Chap. I.
Chaleur produite par le frottement médiat.
Coupe suivant BB Fig. 1.
Fig. 4
Coupe suivant AA Fig. 2
Coupe suivant RR

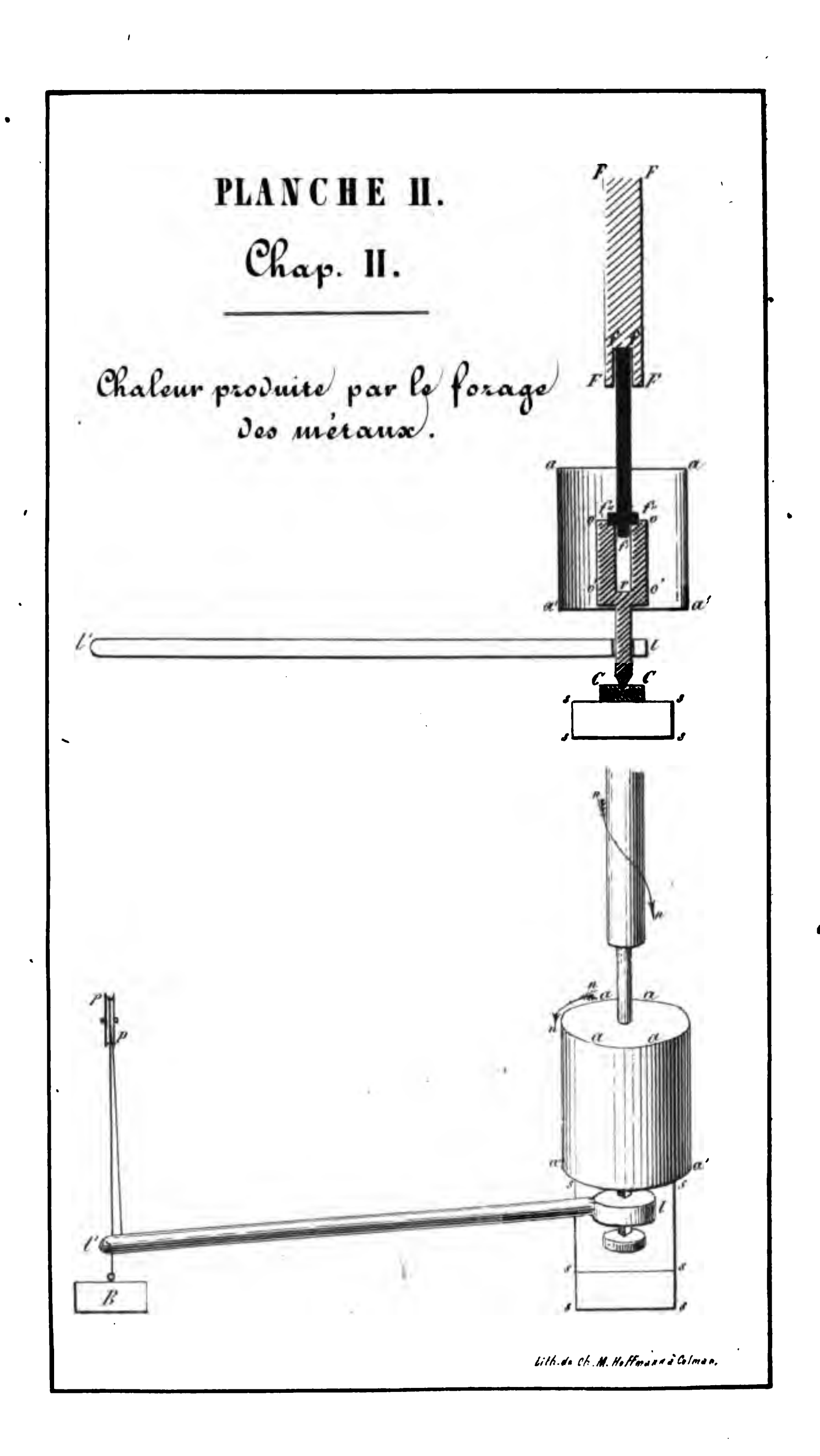
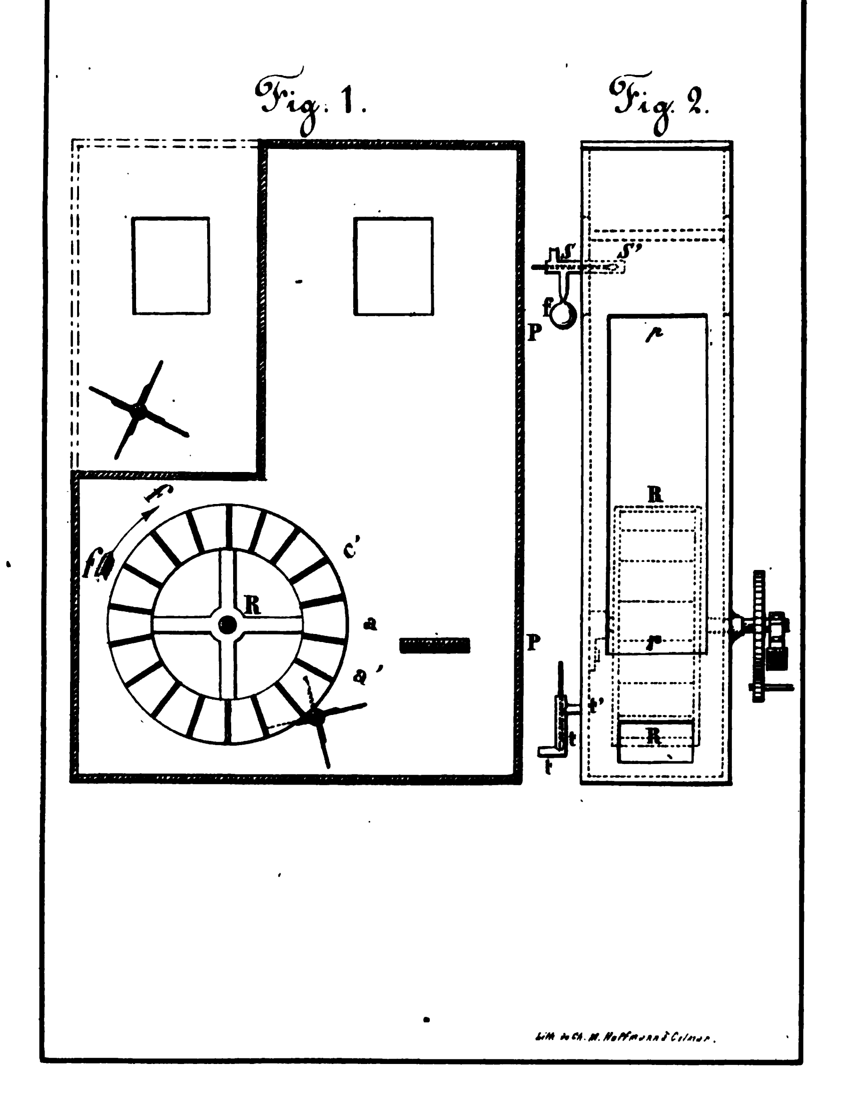

PLANCHE II.
Chap. II.
Chaleur produite par le forage des métaux.
Lith. de Ch. M. Hoffmann à Colmar.

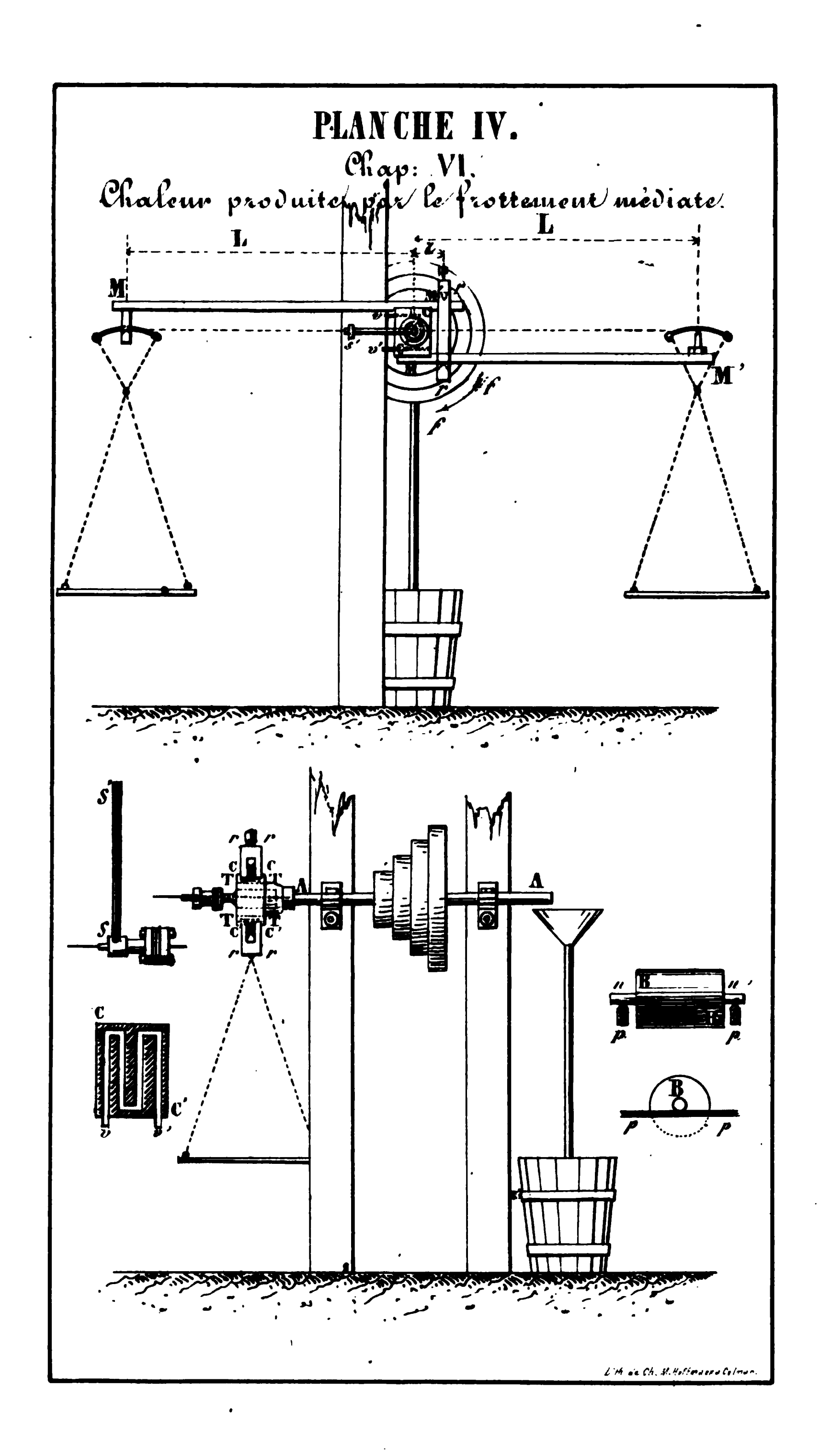
PLANCHE III.

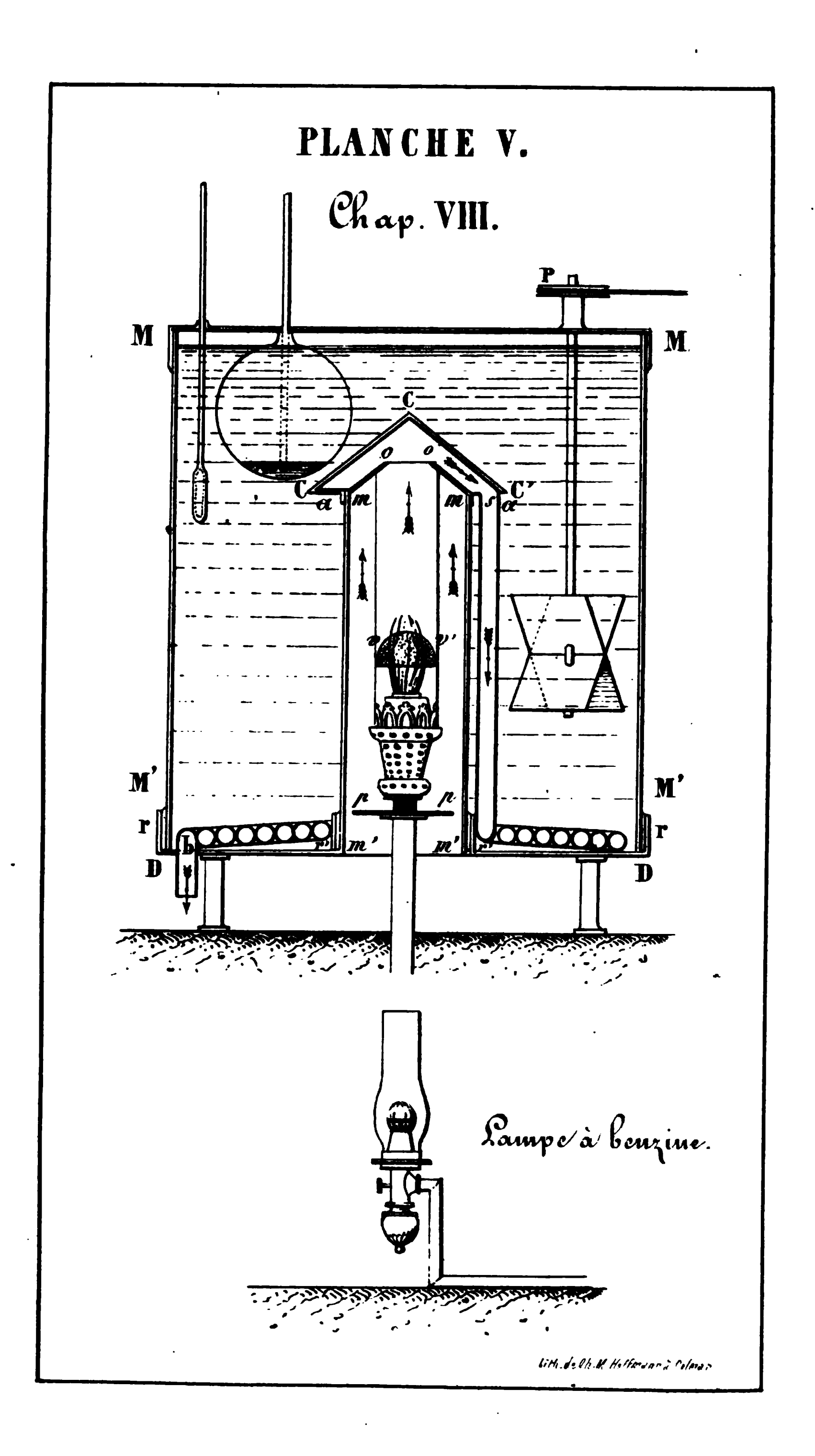
Chap. IV et VII.

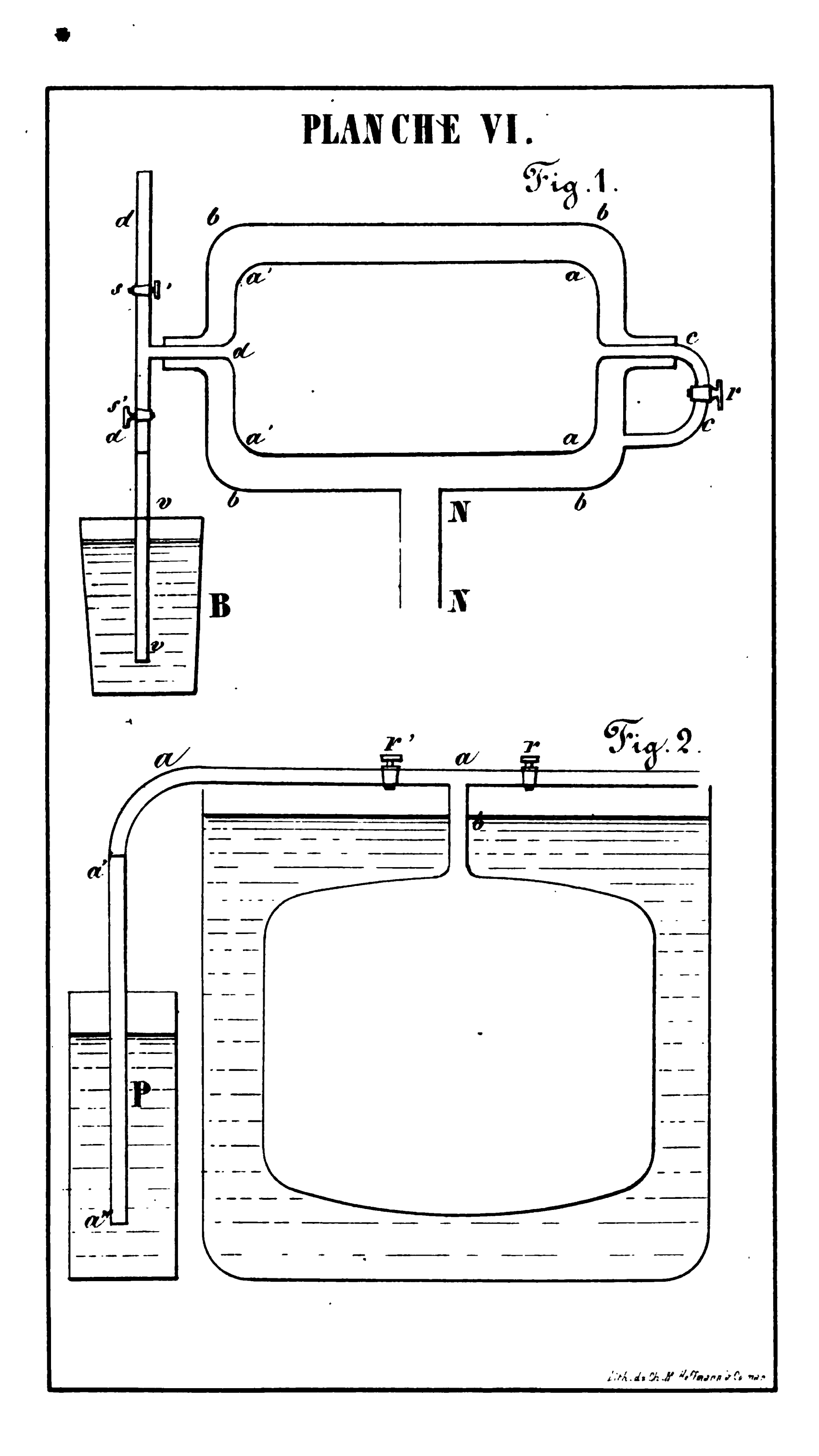


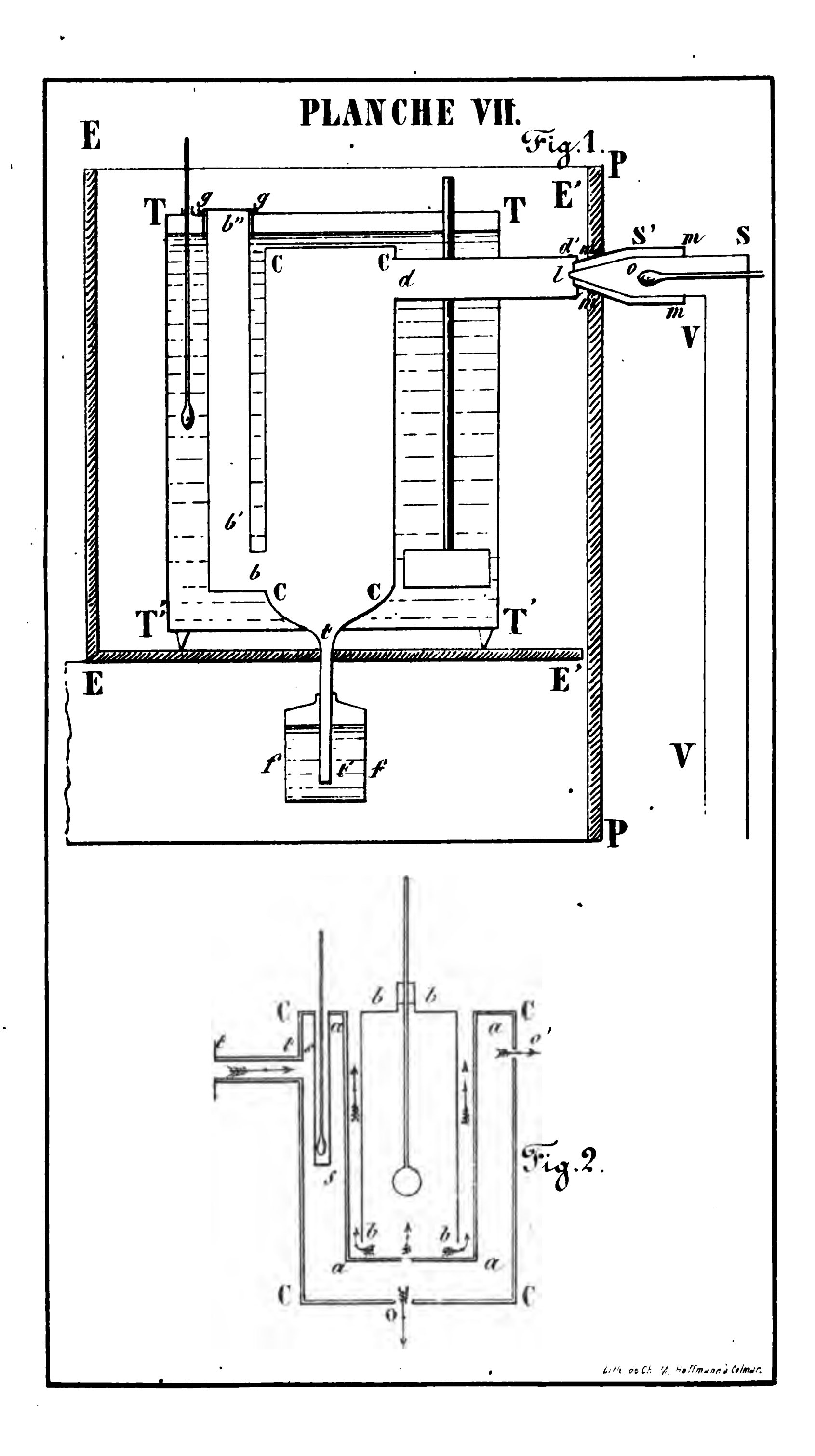
Lith. de Ch. M. Hoffmann à Colmar.




PLANCHE IV.
Chap: VI.
Chaleur produite par le frottement médiate.
L
L
M
M'
A
A
B
B
c
c'
L'th. de Ch. M. Hoffmann à Colmar.


PLANCHE V.
Chap. VIII.
P
M
M
C
o
o
C
C'
a
m
m
s
a'
v
v'
M'
M'
r
r
p
p
b
m'
m'
D
D
Lampe à benzine.


PLANCHE VI.
Fig. 1.
d
s
s'
v
B
b
a'
a
c
r
N
Fig. 2.
a
r'
r
a'
a''
P


PLANCHE VII.
Fig. 1.
E
P
T
g
g
b"
T
E'
S'
m
S
d'
c
c
d
l
o
m
m
V
b'
b
c
c
T'
t
T'
E
E'
V
f
t'
f
P
C
a
b
b
C
a
o'
t
t
s
Fig. 2.
b
b
a
a
C
o
C

ÉCLAIRCISSEMENTS

AU TABLEAU A.

nature des nombres qui s'y trouvent. Les nombres de la colonne V indiquent, P (fig. 1), si le levier L L eût été libre de tourner avec le tambour dont le frotr les poids P (VII) faisant équilibre au frottement, les nombres N. 2m·,52 = E travail mécanique dû au frottement et rapporté au kil. et au mètre, absolument I) par la durée en secondes de chaque expérience, on a évidemment le travail

D'après le tableau B, en nommant Δ la différence entre la température de ltipliant ce produit par la durée D de chaque expérience, on a la quantité tor l'appareil. C'est sur cette donnée que reposent les nombres correctifs de la la température t, y gagnait $t-i$: le produit de $(t-i)$ par le poids W qui pareil. Et la somme $W(t-i) \pm 0{,}0556\ \Delta\ t$ ou $\pm q + q' = Q$ (col. XVIII) lories; autrement dit, elle nous fait connaître le nombre du kil. d'eau que que le rapport du travail mécanique au nombre Q de calories qu'il dévelIII) ce nombre supposé constant, afin que l'on pût plus facilement com- que l'on aurait eue en opérant avec la rigueur nécessaire : c'est ce pro-

la colonne G donne la moyenne de ces observations. La température de de chaque expérience : la colonne XIII donne la moyenne de ces trois pérature de l'eau sortant du tambour n'était notée que quand elle

eil marcher assez longtemps pour que le coussinet prît une tempéracelle qui se perd par les parois, était calculée à l'aide de la loi , le travail mécanique et les calories produites, rapportés à 1 min.

ITES DANS LE CHAPITRE Ier.

OTTEMENT DES CORPS SOLIDES ET LE TRAVAIL CONSOMMÉ.

E SSEMENT alculée. t IX.		OBSERVATIONS RELATIVES AU TABLEAU B. X.
min. sec.		
3,7	1re Expérience.	
3,21		
3,34		
3,50		
4,7		
4,33		
5,5		
5,54		
7		
8,27		
11,28		
16,30		
77,14		
9,37	2e Expérience.	
10,45		
12,4		
15,40		
23,50		
71,36		

Les détails que j'ai donnés sur les expériences rapportées ici et sur la manière dont a été calculée cette table (col. IX), me dispensent de m'étendre beaucoup sur cette question. Je ne m'arrêterai que sur le sens des nombres de la colonne V et sur la 2e expérience.

Dans notre équation $Q\,V\,t = 2{,}3026\,(W + n\,P\,t\,R\,3^{m\cdot},52)\,\log.\,\frac{C-G}{C'-G}$, W représente, comme on a vu, le poids d'eau que valait l'appareil pour chaque expérience et, par suite aussi, le nombre de calories qu'il eût perdu par degré thermométrique, s'il ne s'était pas produit de calorique par le frottement. Ce poids d'eau est indiqué au haut de la colonne VI. Dans la première expérience, par exemple, il était $2^{k\cdot},512 + 3^{k\cdot} = 5^{k\cdot},512$; d'où il suit que 1° représentait $5^{cal\cdot},512$. Dans la même parenthèse ci-dessus, $n\,P\,t\,R\,3^{m\cdot},52$ donne le nombre de calories produites pendant que le thermomètre de l'appareil descend de 1°. Nous avons pour les deux expériences de ce tableau $n = 92$ tours, et j'ai posé $R = 0{,}0027$, d'où $0{,}875\,P\,t = q$ pour l'expérience du nombre de calories dues au frottement. Ce sont là les nombres de la colonne V. La colonne VII n'est autre chose que la somme respective des deux nombres $0{,}875\,P\,t$ et W.

La seconde expérience demande quelques explications, quant à sa traduction en nombres. On voit que le temps n'a été noté que de 5 en 5 degrés d'abaissement. Les poids P de la colonne IV sont les moyennes de ceux qu'il fallait ajouter de 1/2 en 1/2 degré d'abaissement. La chaleur produite était donc encore $0{,}875\,P\,t$; mais cette chaleur répond ici à 5° d'abaissement : il faut donc la diviser par 5, pour qu'en l'ajoutant à W, on ait la perte de calorique par degré. On a par suite $Q = W + 0{,}175\,P\,t$ pour la valeur réelle de ce nombre. C'est ainsi qu'a été calculée la colonne VII, exp. 2e.

On comprendra aisément le motif pour lequel j'ai donné ici des valeurs de Q. Elles font apercevoir, à première vue, pourquoi les intervalles de temps croissent avec une telle rapidité pour chaque degré d'abaissement de température. Supposons, en effet, que l'appareil n'ait pas reçu de calorique par suite du frottement. De 75° à 50° il n'aurait eu à perdre que $5^{cal\cdot},512$ au lieu de $6^{cal\cdot},536$; le temps eût été de $\frac{5{,}512}{6{,}536}\,3^{m\cdot} = 2^{m\cdot}\,31^{sec\cdot}$ au lieu de $3^{m\cdot}$. De 46° à 45°, il n'aurait eu à perdre que $5^{c\cdot},512$ au lieu de $24^{c\cdot},281$: le temps eût été de $\frac{5{,}512}{24{,}281}\,16^{m\cdot},30^{sec\cdot} = 3^{m\cdot}45$ au lieu de $16^{m\cdot}\,30^{sec\cdot}$. Et en vertu de l'équation (3), déduite de la loi de refroidissement $v = V\,(C - G)$, ce sont là les intervalles qui seront entre eux comme les log. des différences. On a en effet $2^{m\cdot}\,31^{sec\cdot} : 3{,}45 :: 1 : \log.\frac{27}{26}$.

RELATIONS QUIS ET LE TRAVAIL CONSOMMÉ.

TEMPÉRATURE du COUSSINET. C I.	TEMPÉRATURE de la CHAMBRE. G II.	DIFFÉRENCE. C — G III.
degrés.	degrés.	degrés.
55	17,8	37,2
54	»	36,2
53	»	35,2
52	»	34,2
51	»	33,2
50	»	32,2
49	»	31,2
48	»	30,2
47	»	29,2
46	»	28,2
45	»	27,2
44	»	26,2
43	»	25,2
42	»	24,2
41	»	23,2
40	»	22,2
39	»	21,2
38	»	20,2
37	»	19,2
36	»	18,2
35	»	17,2
34	»	16,2
33	»	15,2
32	»	14,2

OBSERVATIONS TIVES AU TABLEAU C.

X.

mériques figurent sur ce tableau, a été conduite comme cette seule différence près que le tambour T était essuyé t l'air qui servait ici de matière lubrifiante.

e de la formule (3) ou $QVt = 2{,}3026\ (W + nPRt\ 3{,}52)$

W, t, n, B, C, C′, G les valeurs convenables suivantes.

gal d'un bout à l'autre et l'on avait $n = 92$. Le poids $= 5^{k\cdot},412$. Pour me borner à ne calculer R que 7 fois, temps depuis 55° à 52°, puis de 5 en 5 degrés : on a de la $^{m\cdot},1$, $t = 22^{m\cdot},13$, $t = 28^{m\cdot},333$, $t = 43^{m\cdot},4$. Pour spondantes de P, j'ai multiplié les poids de chacune des pondant ; la somme de ces produits a ensuite été divisée nsi obtenus étaient donc les moyennes exactes pour chaque $\cdot,011$, $0^{k\cdot},013$, $0^{k\cdot},017$, $0^{k\cdot},27$, $0^{k\cdot},66$. Les différences s étaient, comme le tableau le montre, $C - G = 37°{,}2$,

J'ai formé ainsi cinq équations :

$$011\ R : 3)\ \log.\frac{37{,}2}{34{,}2} = QV\ \ 8^{m\cdot},833$$

$$013\ R : 3)\ \log.\frac{34{,}2}{29{,}2} = QV\ 18^{m\cdot},1$$

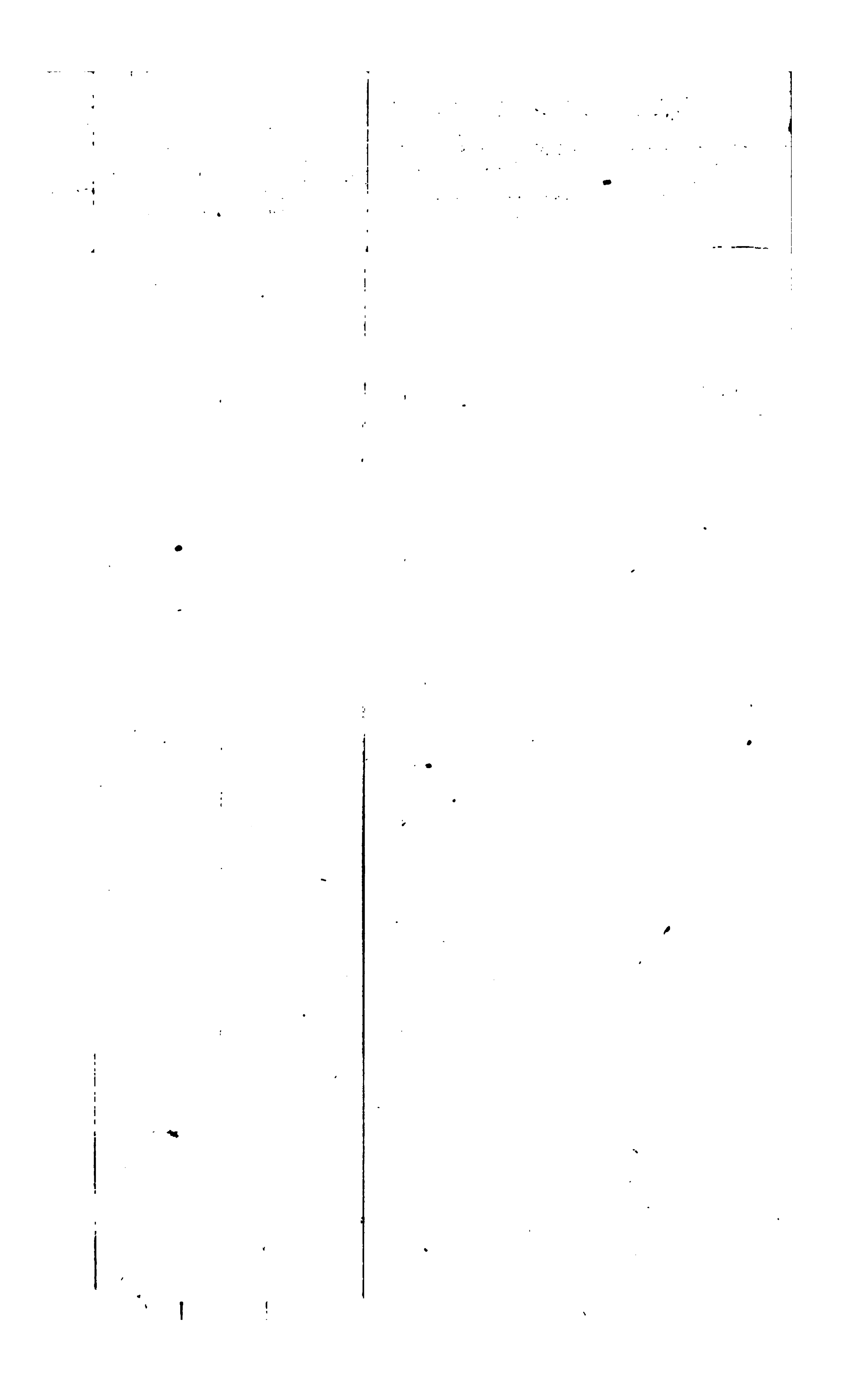
$$017\ R : 3)\ \log.\frac{29{,}2}{24{,}2} = QV\ 22^{m\cdot},13$$

$$027\ R : 3)\ \log.\frac{24{,}2}{19{,}2} = QV\ 28^{m\cdot},33$$

$$066\ R : 3)\ \log.\frac{19{,}2}{14{,}2} = QV\ 43^{m\cdot},4$$

, en éliminant QV par une simple division. On voit, que le rapport du travail au calorique développé n'est il surpasse de beaucoup notre valeur $R = 0{,}0027$ conclue té le frottement (la charge P n'ayant pas dépassé 80 gr., *une légère usure des métaux*. Et c'est à cette usure seule s variations de R ; car, dans une expérience que j'ai bour avec un linge sec, je suis parvenu à maintenir P algré des anomalies et des irrégularités (dont on se ren 'ai vu la valeur de R calculée comme précédemment, ue = 0,0027.

B



, DÉC

EFFORT dû au rottement. C XI.
2k.,405
2k.,15
1k.,88
4k.,34
3k.,97
3k.,94
5k.,76
4k.,67

